

# **Öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysi**

**Toni Mellin**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.10.2016.

**Työn valvoja:**

Prof. Matti Lehtonen

**Työn ohjaaja:**

DI Juhani Lehto

Tekijä: Toni Mellin

Työn nimi: Öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysi

Päivämäärä: 10.10.2016

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+70

Sähkötekniikan ja automaation laitos

Professuuri: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Työn valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja: DI Juhani Lehto

Diplomityön tarkoituksena on selvittää öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysin perusteita sekä tutkia Vaisalan OPT100 liuenneiden kaasujen analysaattorin prototyypin mittaussyvykkyyttä ja tarkkuutta. Diplomityön toisena päämääränä on valmistaa näytteenvalmistuslaite, jolla pystytään valmistamaan öljynäytteitä, joihin on liuotettu haluttuja kaasuja (*gas-in-oil sample*). Kyseisellä laitteella on tarkoitus pystyä luomaan analysaattorilaitteella mitattavia todenmukaisia kaasukonsentraatioita sisältäviä näytteitä, joiden pohjalta voidaan arvioida analysaattorilaitteen suorituskykyä. Lisäksi diplomityössä selvitetään tutkimukseen liittyvää aiempaa kirjallisuutta ja perehdytään liuenneiden kaasujen analyysin menetelmiin sekä muuhun työssä vaadittuun teoreettiseen pohjatietoon.

Tehtyjen mittausten perusteella pystyttiin varmentamaan sekä valmistetun näytteenvalmistuslaitteen liuenneiden kaasuja sisältävien öljynäytteiden näytteenvalmistuskyvyvykkyys että analysaattoriprototyypin mittaussyvykkyys. Valitettavasti kuitenkin mittaustulosten epävarmuuksien ja ristiriitaisuuksien vuoksi ei ollut mahdollista todeta mitään pitävää kummankaan laitteen mittaustarkkuuksista. Saadut tulokset kuitenkin näyttävät sen verran lupaavilta, että käytettyjä menetelmiä parantamalla on tulevaisuudessa mahdollista luoda liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteiden testaukseen ja tutkimukseen soveltuva järjestelmä.

Avainsanat: Liuenneiden kaasujen analyysi, Öljy-analyysi, Tehomuuntaja, Kunnonvalvonta, Öljyn analysaattorilaite

Author: Toni Mellin

Title: Dissolved Gas Analysis in Oil-insulated Power Transformers

Date: 10.10.2016

Language: Finnish

Number of pages: 7+70

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Electricity Distribution and High Voltage Technology

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisor: M.Sc. (Tech.) Juhani Lehto

The aim of the Master Thesis is to present the basic principles of dissolved gas analysis in oil-insulated power transformers and study the measurement capabilities of the research target i.e. Vaisala's prototype of the new OPT100 dissolved gas analysis (DGA) monitor device. For this objective a sample preparation device was created in order to generate the capability of creating gas-in-oil samples. The device in mention needed to be able to generate realistic gas-in-oil samples for the DGA monitor device, in order to enable performance analysis. Additionally the thesis explores previous theoretical knowledge and different methods related to dissolved gas analysis.

Based on performed measurements the created sample preparation devices sample preparation capability was confirmed as well as the measurement capability of the DGA monitor prototype. Unfortunately, due to conflicts with the performed measurements, it was not possible to gain knowledge about the measurement accuracy or sample preparation accuracy of the mentioned devices. However, the results however show promise of the possibility to improve the created setup in the future, in order to make it suitable for future testing and research of DGA analyzer devices.

Keywords: Dissolved Gas Analysis, DGA, Oil analysis, Power Transformer, Condition Monitoring, DGA Monitor, gas-in-oil sample

## Esipuhe

Haluan kiittää professori Matti Lehtosta ja ohjaajaani DI Juhani Lehtoa vastaanottamastani hyvästä ohjauksesta. Suuret kiitokset Vaisala Oyj:lle tästä tilaisuudesta ja erityisesti Riku Hakalalle, Arto Kylmäselle ja ohjaajalleni Juhani Lehdolle, joiden tuki ja usko tutkimuksen tärkeyteen mahdollisti tämän diplomityön. Olen myös erittäin kiitollinen siitä, että Vaisala Oyj:n CEN-organisaation (Controlled Environment) tuotekehityksen DGA-projektiryhmä huolehti kaikista diplomityöstä aiheutuneista kustannuksista.

Haluan kiittää erityisesti kaikkia, joilta olen saanut tukea ja apua diplomityön aikana. Kiitokset tohtori Sami Virtaselle avusta näytteenvalmistuslaitteen suunnittelussa ja liuenneiden kaasujen analyysiin liittyvästä fysiikan tietämyksen lainauksesta. Kiitos erittäin paljon tohtori Ari Laiholle suuresta avusta OPT100-prototyypilaitteeseen liittyvissä ongelmissa ja avusta näytteenvalmistuslaitteen ohjelmiston kehitykseen liittyvien ongelmien selvityksessä. Suuret kiitokset myös FM (fysikaalinen kemia) Sutidara Nopakunille avusta liuenneiden kaasujen analyysin kemiaan liittyvissä kysymyksissä, näytteenvalmistuslaitteiston ideoiden kehittämisessä ja öljynäytteiden analysointiin liittyvissä kysymyksissä. Kiitos FM (fysikaalinen kemia) Timo Venäläiselle käytännön avusta ja tuesta vaihtelevissa ongelmissa. Kiitokset myös Markku Hartikaiselle ja Matti Isomalle avusta laitteiston rakennusvaiheessa. Lopuksi haluan vielä kiittää myös tyttöystävääni ja perhettäni tuesta ja kannustuksesta diplomityöprosessissa.

Otaniemi, 10.10.2016

Toni W. Mellin

# Sisällysluettelo

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tiivistelmä</b>   | <b>ii</b>  |
| <b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>   | <b>iii</b> |
| <b>Esipuhe</b>   | <b>iv</b>  |
| <b>Sisällysluettelo</b>  | <b>v</b>   |
| <b>Symbolit ja lyhenteet</b>   | <b>vi</b>  |
| <b>1 Johdanto</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2 Aikaisempi tutkimus</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 Muuntajan kunnonvalvonta ja eristeet . . . . .                           | 3          |
| 2.2 Liuenneet kaasut muuntajaöljyssä . . . . .                               | 11         |
| 2.2.1 Kaasujen liukeneminen öljyyn . . . . .                                 | 11         |
| 2.2.2 Kaasujen muodostuminen ja vikatyypit . . . . .                         | 16         |
| 2.3 Liuenneiden kaasujen vika-analysointimenetelmät . . . . .                | 24         |
| <b>3 Liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteet</b>                          | <b>32</b>  |
| 3.1 Kaasunäytteen erotusmenetelmät . . . . .                                 | 32         |
| 3.2 Analysaattorilaitteiden liuenneiden kaasujen mittausmenetelmät . . . . . | 33         |
| 3.3 Vaisala OPT100 . . . . .   | 37         |
| <b>4 Mittausjärjestelyt ja -menetelmät</b>                                   | <b>38</b>  |
| 4.1 Mittausjärjestelmä ja näytteenvalmistus . . . . .                        | 39         |
| 4.2 Mittausmenetelmät . . . . .  | 43         |
| 4.3 Mittaustulokset . . . . .  | 45         |
| 4.4 Näytteenvalmistuksen epätarkkuus ja epäideaalisuudet . . . . .           | 49         |
| <b>5 Johtopäätökset</b>  | <b>51</b>  |
| <b>Viitteet</b>  | <b>53</b>  |
| <b>A Liukoisuuskertoimien virheanalyysi</b>                                  | <b>62</b>  |
| <b>B Massavirtasäätimien virtausnopeuden virheanalyysi</b>                   | <b>64</b>  |
| <b>C Näytteenvalmistuksen virhelaskelmat</b>                                 | <b>66</b>  |

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $A$                             | vakio  |
| $B$                             | vakio  |
| $C_B$                           | kaasupullon nimelliskaasun pullopitoisuus  |
| $C_G$                           | kaasun konsentraatio kaasussa  |
| $C_L$                           | kaasun konsentraatio nesteessä   |
| $C_L^0$                         | öljynäytteen alkuperäinen kaasukonsentraatio   |
| €                               | euro   |
| $\delta C_B$                    | kaasupullon nimelliskaasun pullopitoisuuden virhe  |
| $\delta C_L$                    | öljyyn liunneen kaasun pitoisuuden virhe   |
| $\delta C_{L,Ost}$              | öljyyn liunneen kaasun pitoisuuden virhe (liukoisuuskertoimen virhe huomioituna laskennassa)                                     |
| $\delta C_{L,Ost,P}$            | öljyyn liunneen kaasun pitoisuuden virhe (painekompensoidulla virtauksella ja liukoisuuskertoimen virhe huomioituna laskennassa) |
| $\delta C_{L,P}$                | öljyyn liunneen kaasun pitoisuuden virhe (painekompensoidulla virtausnopeudella laskettuna)                                      |
| $\delta F_G$                    | syötetyn kaasun virtausnopeuden virhe  |
| $\delta F_T$                    | syötettyjen kaasujen kokonaisvirtauksen virhe  |
| $\delta L$                      | liukoisuuskertoimen suhteellinen virhe   |
| $\delta q$                      | virheen etenemislaila lasketun yhtälön $q$ virhe   |
| $\delta x_i$                    | muuttujan $x_i$ virhe  |
| $e$                             | luonnollinen logaritmi   |
| $F_{Cr}$                        | massavirtasäätimen korjauskerroin tietylle kaasulle  |
| $F_{Cr,R}$                      | massavirtasäätimen suhteellinen korjauskerroin tietylle kaasuseokselle   |
| $F_G$                           | syötetyn kaasun virtausnopeus  |
| $F_{G,P}$                       | syötetyn kaasun painekompensoitu virtausnopeus   |
| $F_T$                           | syötettyjen kaasujen kokonaisvirtaus   |
| $K$                             | kaasun liukoisuuskerroin   |
| $K_2$                           | Henryn lain liukoisuusvakio  |
| $K_H$                           | Henryn lain vakio  |
| $K_i$                           | Henryn lain liukoisuuskerroin  |
| $L$                             | Ostwaldin kerroin, liukoisuuskerroin   |
| $P_A$                           | normaali ilmanpaine $\approx 1,013$ bar  |
| $P_C$                           | paine kaasukammiossa   |
| $P_G$                           | <i>partial pressure</i> , kaasun osapaine  |
| $PerUnitLife$                   | eristeen eliniän yksikköön suhteutettu kerroin;  |
| $q$                             | useiden muuttujien $x_i$ funktio   |
| $\sum_i$                        | summa indeksin $i$ yli   |
| $\theta_H$                      | käämityksen kuumimman pisteen lämpötila, °C  |
| $V_G$                           | kaasun tilavuus  |
| $V_L$                           | nesteen tilavuus   |
| $X_G$                           | mooliosuuden liukoisuus  |
| $x_i$                           | muuttuja   |
| $\frac{\partial}{\partial x_i}$ | osittaisderivaatta muuttujan $x_i$ suhteen   |

## Lyhenteet

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| CH <sub>4</sub>               | <i>methane</i> , metaani  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | <i>acetylene</i> , asetyleeni (systemaattinen kemiallinen nimi, etyyni)                                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | <i>ethylene</i> , etyleeni (systemaattinen kemiallinen nimi, eteeni)                                    |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | <i>ethane</i> , etaani  |
| CBM                           | <i>Condition Based Maintenance</i> , kuntoperusteinen kunnossapito                                      |
| CM                            | <i>Corrective Maintenance</i> , korjaava kunnossapito   |
| CO                            | <i>carbon monoxide</i> , hiilidimonoksidi   |
| CO <sub>2</sub>               | <i>carbon dioxide</i> , hiilidioksidi   |
| DC                            | <i>direct current</i> , tasavirta   |
| DP                            | <i>degree of polymerization</i> , polymerisoitumisaste, DP-luku   |
| DGA                           | <i>Dissolved Gas Analysis</i> , liuenneiden kaasujen analyysi   |
| H <sub>2</sub>                | <i>hydrogen</i> , vety  |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | <i>hydrogen peroxide</i> , vetyperoksidi  |
| IR                            | <i>infrared</i> , infrapuna   |
| KES                           | kaiken kaikkiaan erinomainen sampleri   |
| N <sub>2</sub>                | <i>nitrogen</i> , typpi   |
| O <sub>2</sub>                | <i>oxygen</i> , happi   |
| OLCM                          | <i>On-line Condition Monitoring</i> , käytönaikainen kunnonvalvonta                                     |
| PD                            | <i>partial discharge</i> , osittaispurkaus  |
| ppm                           | <i>parts-per-million</i> , kappaletta tai partikkelia miljoonassa (suhdeluku), esimerkiksi µl/l öljyssä |
| RCM                           | <i>Reliability Centered Maintenance</i> , luotettavuusperusteinen kunnossapito                          |
| TAN                           | <i>Total Acid Number</i> , kokonaishappamuusaste  |
| TBCM                          | <i>Time Based Condition Monitoring</i> , aikaperusteinen kunnonvalvonta                                 |
| TBM                           | <i>Time Based Maintenance</i> , aikaperusteinen kunnossapito  |
| TCG                           | <i>Total Combustible Gases</i> , palavien kaasujen kokonaismäärä  |
| TDCG                          | <i>Total Dissolved Combustible Gases</i> , liuenneiden palavien kaasujen kokonaismäärä                  |

# 1 Johdanto

Nykyaikana sähkön saatavuus vuorokauden ympäri on välttämättömyys kotitalouksille ja teollisuudelle. Maailman energiatarpeiden kasvaessa sähköverkkojen toiminta ja niiden ylläpito korostuu entistä merkittävämmäksi ja ajankohtaisemmaksi, sillä pitkien katkosten syntyminen sähköjakeluun ei ole hyväksyttävää. Pitkistä katkoksista aiheutuu suoraa haittaa käyttäjille, jonka vuoksi erilaisten direktiivien ja säädösten mukaisesti on määrätty lisäkustannuksia sähköverkon ylläpitäjille keskeytyneestä sähkömyynnistä aiheutuvien tappioiden lisäksi. Sähköverkon toiminnalle tärkeimpiä ja kalleimpia komponentteja ovat muuntajat. Tehomuuntajien kunnonvalvontaan on olemassa useita erilaisia menetelmiä, jotka on kuvattu standardeissa ja teknisissä ohjeissa [1].

Yksi kattavimpia kunnonvalvontakeinoja muuntajille on liunneiden kaasujen analyysi eli DGA (*dissolved gas analysis*) [1]. DGA:ta on verrattu muuntajalle tehtäväksi veriko-keeksi, jolla voidaan arvioida muuntajan nykyistä kuntoa, tulevien ongelmien syntymistä ja arvioida mahdollisia hoitokeinoja [2]. DGA:n peruserä on yksinkertainen; muuntajan ikääntyminen ja erilaiset vikatilanteet aiheuttavat muuntajan eristeiden eli käämitysten ympärillä olevan selluloosan tai muuntajaöljyn rappeutumista ja kemiallista hajomista. Tästä seuraa erilaisten kaasuyhdisteiden muodostuminen muuntajan sisällä. Kaasuyhdisteet liukenevat muuntajaöljyyn kokonaisuudessaan tai osittain. [2] Muuntajaöljyyn liuenneita kaasuja voidaan käyttää hyväksi muuntajassa tapahtuneiden vikatilanteiden selvitykseen [3] ja muuntajan yleisen toimintakunnon arvioimiseen.

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää öljyeristeisten tehomuuntajien liunneiden kaasujen analyysin perusteita ja perehtyä mittausten menetelmiin sekä mittausteknologiaan. Diplomityössä tutkitaan tutkimuksen kohteena olevan Vaisalan tuotekehityksen OPT100 liunneiden kaasujen analyysilaitteen prototyypin mittaustarkkuutta ja tarkkuutta. Tämän tutkimiseksi diplomityössä suunniteltiin ja valmistettiin liunneita kaasuja sisältäviä öljynäytteitä valmistava näytteenvalmistuslaitte. Näytteenvalmistuslaitteella on tarkoitus pystyä luomaan tutkittaville analyysilaitteille mitattavia realistisia kaasukonsentraatioita sisältäviä näytteitä. Tavoitteena on selvittää ja todentaa työn kohteena olevan OPT100 prototyypin mittaustarkkuus ja suorituskkyvyt. Lisäksi on tärkeää todentaa ja selvittää valmistetun näytteenvalmistuslaitteen kyvyt tuottaa näytteitä.

Diplomityö on jäsennetty seuraavalla tavalla: Kappaleessa 2 esitetään aiheeseen liittyvää aikaisempaa tutkimusta ja esitellään liunneiden kaasujen analyysin peruseräatetta sekä teoreettista taustaa. Lisäksi kappaleessa käsitellään lyhyesti muuntajan kunnonvalvonnan tärkeyttä ja eri kunnonvalvonnan tasoja. Liunneiden kaasujen muodostumista ja muuntajan ikääntymisen aikana tapahtuvia ikääntymisprosesseja käydään myös läpi. Kappaleessa selvitetään kuinka kaasut liukenevat muuntajaöljyyn ja kuinka tietyt kaasut muodostuvat sekä minkälaisiin vikatyyppeihin niitä voidaan yhdistää. Lopuksi liunneiden kaasujen analyysimenetelmiä selvitetään vielä tarkemmin ja esitetään valittuja malleja, kuten esimerkiksi Duvalin kolmio-malli ja IEC:n 60599 standardin esittämät menetit ja lisäksi pohditaan analyysien tekoa varten vaadittuja mittaustarkkuuksia.

Kappaleessa 3 esitetään liunneiden kaasujen analyysilaitteisiin liittyviä perusteita ja niiden toimintamenetelmiä. Kappaleessa selvitetään lisäksi lyhyesti, kuinka laboratorioiden kaasunäytteen erotus -menetelmät eroavat toisistaan. Kappaleessa 3 myös käsitellään eri analyysilaitteiden mittausteknologioiden menetelmiä. Lisäksi kappaleessa esitel-



lään tutkimuksen kohteena oleva analysaattorilaitteen prototyyppi ja sen ominaisuudet lyhyesti.

Työssä tehtyt implementaatiot ja erilaiset mittausjärjestelyt sekä menetelmät esitellään kappaleessa 4. Analysaattorilaitteilla mitattavien näytteiden valmistuksen periaatteet ja menetelmä esitellään samassa kappaleessa ja myös esitellään valmistetun näytteenvalmistuslaitteiston toimintaperiaatteet. Lisäksi kappaleessa esitellään mittausjärjestelmä kokonaisuutena ja esitetään mittaustulokset sekä niihin liittyvien virheiden arviointia. Kappaleessa myös arvioidaan valmistetun näytteenvalmistuslaitteen kyvykkyyttä luoda liunneiden kaasujen öljynäytteitä (*gas-in-oil samples*), josta vielä syvempää analyysiä on tehty liitteissä A - C.

Kappaleessa 5 selvitetään mittaustulosten perusteella tehtyjä johtopäätöksiä analysaattorilaitteen suorituskyvystä. Kappaleessa myös arvioidaan valmistetun näytteenvalmistuslaitteen kyvykkyyttä luoda liunneiden kaasujen öljynäytteitä (*gas-in-oil samples*). Lisäksi kappaleessa pyritään arvioimaan mittauksen epäideaalisuuksia ja mahdollisia puutteita sekä niiden vaikutusta mittaustuloksiin. Kappaleessa myös pohditaan mahdollisia kehitysideoita ja lisätutkimuksen suuntia.

## 2 Aikaisempi tutkimus

Sähköverkon käyttämien komponenttien ja suurjännitelaitteiden eristys ei pysy ideaalisena koko käyttöiän ajan, sillä se altistuu monille muutoksille erilaisista mekaanisista, termisistä, kemiallisista ja sähköisistä rasituksista johtuen. Eristykseen kohdistuvia olosuhteita ja rasitusta ei voida ennustaa tai arvioida riittävän tarkasti, jotta pystyttäisiin luotettavasti arvioimaan eristeen pitkäaikainen kestävyys. Myös suurjännitelaitteiden vaihtelevat käyttötavat, testausmenetelmät, käytöstä aiheutuneet ylijännitteet, eristeen mitoitus ja materiaalivalinnat vaikuttavat laitteen elinikään ja kestävyys. Lopulta tämä johtaa käytännössä siihen, että käytettyjen komponenttien ja suurjännitelaitteiden turvallisen toiminnan varmistaminen vaatii kunnonvalvontaa.[4]

Tässä kappaleessa tarkastellaan muuntajien erilaisia kunnonvalvonnan menetelmiä ja -strategioita. Kappaleessa siirrytään nopeasti diplomityön aiheeseen eli muuntajaöljyyn liunneisiin kaasuihin, niiden syntyyn, öljyyn liukenemiseen ja eri vikatyyppeihin ja vikojen analysointimenetelmiin.

### 2.1 Muuntajan kunnonvalvonta ja eristeet

Suurjännitelaitteiden kunnonvalvonta on kehittynyt paljon vuosien varrella, kuten myös kunnossapidon strategiat. Aikoinaan voitiin pitää täysin hyväksyttävänä strategiana antaa muuntajan olla toiminnassa, kunnes aiheutui vika eli viat korjattiin niiden ilmetessä. Kyseinen strategia on vieläkin käytössä vioille, joiden vaikutukset ovat pieniä. Sen sijaan katastrofisten vikojen varalta käytettävänä kunnonvalvontastrategiana ei enää voida hyväksyä käyttöä vioittumiseen. Varsinkin kun puhutaan verkolle äärimmäisen tärkeistä komponenteista ja vakavia seurauksia aiheuttavista vioista. Tämä johtuu erinäisistä turvallisuussyistä ja selkeistä kustannustehokkuuden haitoista. [4] Korkeampaa kunnonvalvonnan ja kunnossapidon tasoa ylläpitäviä suurjännitelaitteiden kunnonvalvontastrategioita ovat:

- aikaperusteinen kunnossapito (*Time Based Maintenance*, TBM),
- kuntooperusteinen kunnossapito (*Condition Based Maintenance*, CBM),
- luotettavuusperusteinen kunnossapito (*Reliability Centered Maintenance*, RCM),
- korjaava kunnossapito (*Corrective Maintenance*, CM),
- aikaperusteinen kunnonvalvonta (*Time Based Condition Monitoring*, TBCM),
- käytönaikainen kunnonvalvonta (*On-line Condition Monitoring*, OLCM),
- jatkuva käytönaikainen kunnonvalvonta (*Continuos On-line Monitoring*). [1][4]

Aikaperusteinen kunnossapito (*Time Based Maintenance*, TBM) on käytännössä laitteen huoltoa määrätyn välein, jotta voidaan vähentää laitteen vikaantumista. Aikaperusteisessa kunnossapidossa huolto tehdään laitteen tai sen osien kunnosta riippumatta määrätyn aikavälin mukaisesti. Eli käytännössä seurataan valmistajien määräämiä huoltovälejä ellei tiukempia säännöksiä ole muusta syystä tai standardin vaatimana syytä noudattaa. Aikaperusteinen kunnossapito on suhteellisen kustannustehoton, sillä huolto tehdään kunnosta

riippumatta. Kustannustehokkaampi strategia on kuntoperusteinen kunnossapito (*Condition Based Maintenance*, CBM), jossa huollot pyritään suunnittelemaan ja tekemään kunkin laitteen ja sen osien huoltotietojen ja kunnan perusteella. Kunnan määrittelemiseksi vaaditaan tietenkin kunnanvalvontaa (TMCM, OLCM tai jatkuva käytönaikainen kunnanvalvonta), käytettävä kunnanvalvontastrategia riippuu kyseisestä osasta ja sille mahdollisista kunnanvalvontamahdollisuuksista. Luotettavuusperusteinen kunnossapito (*Reliability Centered Maintenance*, RCM) perustuu siihen, että laitteen mahdollisten vikojen seurauksissa otetaan huomioon laitteen tekninen tärkeys verkolle, laitteen kunto, sijainti verkossa, mahdolliset vikojen aiheuttamat riskit ja toiminnan keskeytyksen aiheuttamat seuraukset. Laitteet järjestetään kriittisyyden perusteella tärkeysjärjestykseen ja niille määrätään vaadittu luotettavuus (*reliability*). Kriittisyyden ja seurausten perusteella määritellään vaadittavat laitteen ja sen komponenttien huoltovälit. Korjaava kunnossapito (*Corrective Maintenance*, CM) on jo syntyneiden vikojen korjausta ja laitteen palauttamista vikaa edeltäneeseen kuntoon. Korjaava kunnossapito tapahtuu aikaperusteisen kunnanvalvonnan tai käytönaikaisen kunnanvalvonnan havainnointien tai vikatilanteen jälkeisen tarkistuksen perusteella. Tämä toimenpide ei ole tavallinen osa aikaperusteista kunnossapitoa tai kuntoperusteista kunnossapitoa.

Ero jatkuvan käytönaikaisen kunnanvalvonnan ja käytönaikaisen kunnanvalvonnan suhteen on mittausväli, eli onko kunnanvalvonta jaksoittaista vai jatkuvaa. [1][4] Tosin kirjallisuudessa ja tuote-esitteissä usein käytetään jatkuvasta käytönaikaisesta kunnanvalvonnasta termiä (*on-line condition monitoring*) eli käytönaikainen kunnanvalvonta, mitä se käytännössä onkin, mutta vain tiheämmällä mittausvälillä. Aikaperusteinen kunnanvalvonta taas on määrätyin aikavälein tehtäviä kunnanvalvontatoimenpiteitä, joita ei usein voida luokitella käytönaikaiseen kunnanvalvontaan, sillä tehtävät toimenpiteet vaativat usein muuntajan toiminnan keskeyttämisen. Tällöin kyseessä on keskeyttävä kunnanvalvonta (*off-line monitoring*). [1] Kunnossapidon ja kunnanvalvonnan kokonaisuus koostuu usein yhdistelmästä useita eri kunnossapito- ja kunnanvalvontastrategioita. Eri osille samaa suurjännitelaitetta kuten muuntajaa voi olla käytössä eri strategioita riippuen osan merkityksestä muuntajan kokonaiskunnolle ja sen tavanomaisesta vaihtovälistä. [1]

Eri kunnanvalvonta- ja kunnossapitostrategioiden implementoinnin takana on pyrkimys niiden kustannustehokkaaseen yhdistelmään, välttää turhat tappiot ja laitteiden toimintakyvyn menetys sekä varmistaa laitteiden luotettavuus. Kustannussyistä pyritään tietenkin välttämään turhia investointeja, tarkistuksia, kunnanvalvontaa ja määräaikaishuoltoja. Tämä johtaa usein siihen, että kunnanvalvontaa ylläpidetään useimmiten vain tärkeimmille, verkon kannalta kriittisimmille ja strategisesti olennaisimmille laitteille sähköverkossa. [1]

Sähköverkon muuntajia on erityyppisiä. Jakeluverkon muuntajat eli jakelumuuntajat ovat nimellisteholtaan ja fyysiseltä kooltaan pienempikokoisia ja hinnaltaan edullisempia verrattuna suurempikokoisiin siirtoverkon tehomuuntajiin. Siirtoverkossa käytettävien tehomuuntajien nimellistehot taas ovat paljon korkeampia ja niiden hintakin on useimmiten useita miljoonia euroja. Muuntajat voivat tuottaa hyötyä ja rahallista vastinetta omistajalleen vain kun ne ovat käytössä ja toimivat osana verkkoa. Yleisesti olemassaoleva käytäntö tai ajatusmalli on, että jakelumuuntajia ei ole kustannustehokasta valvoa jatkuvalla käytönaikaisella kunnanvalvonnalla, mutta sen sijaan siirto- tai tehomuuntajia on yleensä kustannustehokasta valvoa, etenkin silloin, kun tiedetään muuntajassa esiintyvän vikojen.

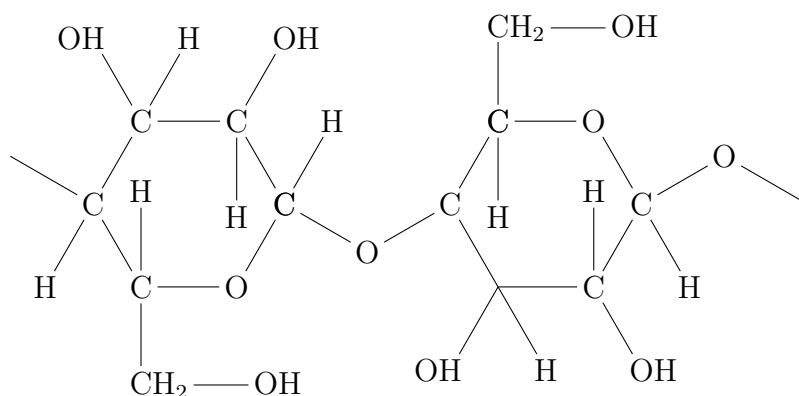
Tavanomaisesti muuntajien jatkuvaa käytönaikaista kunnonvalvontaa suositellaan, kun muuntajassa on havaittu vikoja [5] tai muuntaja otetaan ensimmäistä kertaa käyttöön, tai kun kyseessä on verkolle erityisesti kriittinen muuntaja. Varsinkin kriittisistä muuntajista on hyödyllistä tehdä ensimmäisten käyttökuukausien ajan perusteellisia kunnonvalvontatestejä muuntajan valmistuksen laadun takaamiseksi. Liuenneiden kaasujen analyysin ja öljylle tehtävien testien erotessa IEEE:n standardeiden C57.104 tai C57.106 määrittelemistä tavanomaisista lukemista on syytä varmistaa muuntajan toimintakyky. [6] Tästä syystä jatkuvia käytönaikaisia liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteita saatetaan suosia muuntajan käytön alkuvaiheissa, jolloin muuntajan kokonaisvaltainen takuu on myös voimassa.

Muuntajien vikaantumisaste on tavanomaisesti 0,5 % ja 3 % välillä per vuosi [7]. Vikojen aiheuttamia kustannuksia ja jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan etuja arvioi-  
 dessa voidaan olettaa keskimääräisen vikaantumisasteen olevan noin 1 % per vuosi [7][8]. Arvioitu muuntajan vikaantumisaste 1 % per vuosi tarkoittaa esimerkiksi 1000 muuntajan populaatiossa sitä, että 10 muuntajaa kyseisestä ryhmästä kohtaa todennäköisesti vakavan vian vuoden aikana. Jatkuvalla käytönaikaisella kunnonvalvonnalla yhdessä diagnostisten metodien kanssa voidaan ehkäistä vakavien vikojen syntymistä [4]. IEEE:n opas C57.143 ja Cigrén tekninen opas 248 arvioivat jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan olevan kykenevä havaitsemaan 60% vioista, joita ei voida havaita tavanomaisin kunnonvalvontakeinoin. Tavanomaisin kunnonvalvontakeinoin ei-havaittavissa oleviin vikoihin arvioidaan kuuluvan noin 70 % vioista. Vikojen kustannukset ovat riipuvaisia vian vakavuudesta ja vaadittavista korjaustoimista, mutta useimpien laskelmien perusteella jatkuva käytönaikainen kunnonvalvonta tuo vuosittaisia säästöjä muuntajan omistajalle vähentyneiden huoltokustannusten kautta. [7][9] Cigrén opas arvioi muuntajassa tapahtuneelle vakavalle vialle korjauskustannuksiksi noin 1,5 miljoonaa euroa ja katastrofisen vian kustannukseksi arvioilta 4,5 miljoonaa euroa muuntajan omistajalle [9]. Vikojen aiheuttamien korjaamiskulujen ja vahinkojen lisäksi syntyy lisäkustannuksia, kun muuntajaa ei pystytäkään käyttämään. Esimerkiksi sähköntuotannossa käytettävien muuntajien käyttökyvyttömyys aiheuttaa menetetyt sähköntuotannon kautta kustannuksia tuottamattomasta sähköstä ja sähkönsiirrossa siirtämättömästä sähköstä. IEEE:n opas arvioi jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan tuovan todennäköisesti vähentyneiden vikojen kautta 60 kertaa menetetyt sähköntuotannon (€/MWh) arvosta säästöä vuositasolla [7]. Lisäksi opas arvioi jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan tuovan 0,2071 kertaa toteutumattoman sovitun sähkönsiirron (€/MWh) arvosta säästöä [7]. Tämä kertoo vikojen välttämisen tärkeydestä, kuten myös jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan taloudellisista hyötyvaikutuksista muuntajan omistajalle. Lisäksi hyvin järjestetty ja tehokas jatkuva käytönaikainen kunnonvalvonta pidentää muuntajan käyttöikää, parantaa käyttöturvallisuutta ja helpottaa muuntajalle turvallisen kuormituksen seurantaa.

Muuntajien käämitysten ja muiden sähköisten komponenttien eristeenä toimii käämitysten ympärille kääritty öljyimpregnoitu paperi ja koko muuntajan sisätilan ympäröivä muuntajaöljy, jotka molemmat muodostuvat orgaanisista aineista. Muuntajaöljy on valmistettu mineraaliöljystä joka muodostuu pääasiassa nafteenisistä ja parafiinisista hiilivetyraken-teista, mutta myös aromaattisia öljyjä voidaan käyttää erityiskohteissa [4]. Muuntajaöljyn pääasiallinen tarkoitus muuntajassa on sähköinen eristys ja jäähdytys. Öljyimpregnoitu paperi toimii sekä mekaanisena, että sähköisenä eristeenä muuntajan käämitykselle. Pa-

perin impregnointi parantaa sen läpilyöntilujuutta huomattavasti alkuperäisestä ja siten paperilla voidaan saavuttaa 40 - 75 kV/mm sähköinen lujuus. [4] Muuntajaöljyjen ominaisuudet vaihtelevat öljylajeittain ja niiden jalostusasteen mukaisesti mutta uuden, puhtaan ja kosteutta sisältämättömän öljyn läpilyöntilujuus on pienimmässä jänniteluokassakin 25 kV/mm [10]. Öljyn ja öljyimpregnoitun paperin läpilyöntilujuuteen vaikuttavat myös imeytynyt kosteus ja lämpötila, jotka myös aiheuttavat ylimääräistä räsitusta ja ikäännyttävät eristeitä [4]. Muuntajien keskimääräisesti 40 vuoden elinkaaren aikana niiden eristeet kohtaavat erilaisia rasituksia, mitkä aiheuttavat eristeiden ikääntymistä ja rappeutumista [11].

Muuntajan eristyksessä käytetty paperi valmistetaan puuhiokkeesta ja se koostuu tyypillisesti pääosin (noin 80%) selluloosasta. Paperi koostuu selluloosan lisäksi tyypillisesti hemiselluloosasta, ligniinistä ja mahdollisesti myös epäorgaanisista aineista. Jos eristepaperia on käsitelty lämpökestävyyden parantamiseksi se voi sisältää myös muita yhdisteitä, kuten esimerkiksi syanoetylaattia, jonka tarkoitus on estää veden muodostumista selluloosarakenteeseen. [12] Selluloosan kemiallinen koostumus on  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , jossa  $n$  on polymeerin monomeerien määrää kuvaava kokonaisluku. Selluloosaketjun kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 1. Polymerisoitumisaste (*degree of polymerization*, DP) vastaa suhteellisen tarkasti selluloosan monomeerien lukumäärää [4][13][14] eli glukoosirenkaiden määrää selluloosamolekyylissä [15][16]. Polymerisoitumisaste tunnetaan kunnonvalvonnassa DP-lukuna ja sillä voidaan arvioida eristeen ikää ja niin mekaanista kuin sähköistä kestävyyttä sekä mitata kestävyyyden heikkenemistä ajan suhteen [4][17][18].



Kuva 1: Selluloosaketjun kemiallinen rakenne [19, mukaillen].

Uuden paperin DP-luku vaihtelee välillä 1000 - 1500 [16][18][20][21][22]. Kun paperi on käsitelty ja asennettu osaksi käämitystä, sen DP-luku pienenee hieman, mutta osana käämitystä sen DP-luku on noin 1000-1250 ja siihen imeytynyt kosteus noin 0.5% [12][16][20][23]. Paperin ikääntyessä ja kohdatessa erilaisia rasituksia sen polymeerirakenne pilkkoutuu pienemmiksi ketjuiksi ja paperin DP-luku pienenee [4]. DP-luvun ollessa välillä 500-1000 paperin mekaaninen kestävyys on lähes vakio, mutta DP-lukujen 200-500 välillä paperin mekaaninen kestävyys heikkenee lähes lineaarisesti DP-luvun suhteen [16][21][23][22]. DP-luvun voimakkaampi ikääntyminen sen käytön alkuvaiheessa voi johtua siitä, että paperin polymeeriketjut tutkimusten mukaan hajoavat todennäköisimmin ketjun keskivaiheelta [24][25]. Paperin käyttöiän ollessa loppuvaiheessa siitä mitattu DP-luku on noin 200 jolloin sen vetolujuus heikkenee alle 30 - 20 % [16][26][23][12].

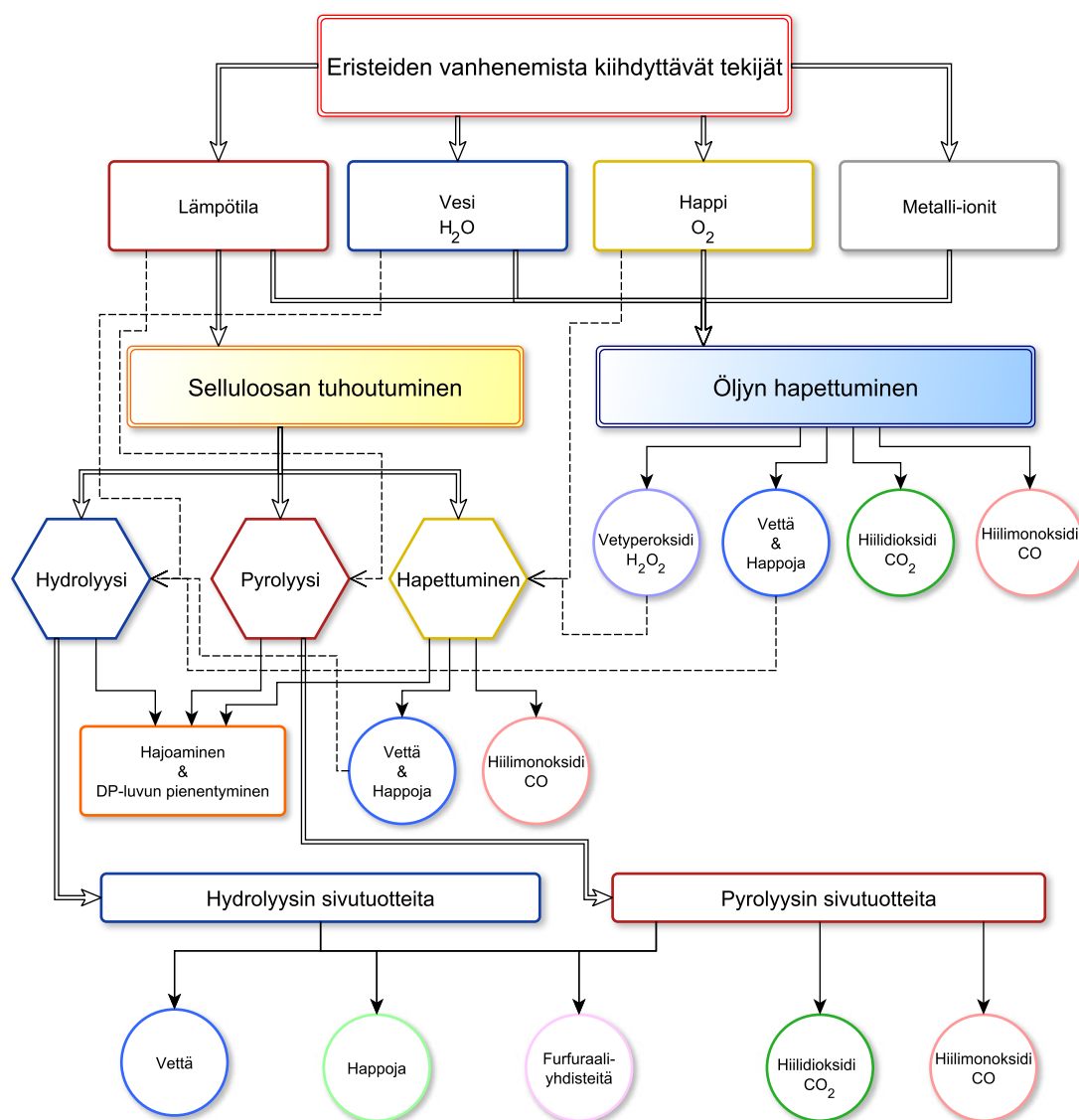
Kun DP-luku on pudonnut alle 150:n paperin mekaaninen kestävyys on hävinnyt täysin [16][22][18]. Siinä vaiheessa, kun eristeen mekaaninen vahvuus ei ole enää riittävä, pienemmätkin vikavirrat tai rasitteet käämitykselle voivat aiheuttaa koko muuntajalle vakavan vikatilanteen. On myös hyvä muistaa, ettei mekaaninen kestävyys välttämättä korreloi suoraan muuntajan toimintakyvyn kanssa, sillä on tapauksia, joissa selluloosan vetolujuus on pudonnut alle 20 % muuntajan ollessa edelleen normaalikäytössä ja toiminnassa. IEEE:n kuormitusstandardi pitää DP-lukua paljon parempana kuvaamaan eristepaperin mekaanista vahvuutta kuin jäljelle jääneen vetolujuuden mittausta. [27]

DP-luvun eli polymerisaatioasteen mittausta vaatii, että paperista leikataan fyysinen näytetapa, jonka vuoksi käytönaikainen tarkka polymerisaatioasteen analyysi ei ole mahdollinen ja vaikea toteuttaa myös muuntajan ollessa pois käytöstä. [4] DP-luvun arvioimiseen käytön aikana käytetään muuntajaöljyyn liukenevia furfuraaliyhdisteitä ja hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) ja monoksidia ( $\text{CO}$ ). Furfuraali-analysissä tutkitaan useimmiten 2-furfuraldehydin liuennutta pitoisuutta öljyssä, jonka konsentraatio vastaa epäsuorasti tiettyä paperin kunnottasoa ja DP-lukua [15][23][28]. 2-furfuraldehydi on kaikista yleisin furfuraaliyhdiste, joka syntyy paperin hajoamisen sivutuotteena [29]. Uudessa paperissa 2-furfuraldehydipitoisuus on luokkaa 0-0,1 ppm ja käyttöikänsä loppuun päättäneestä paperista öljyyn irronnut pitoisuus on noin 10 ppm tai yli [18]. Furfuraali-yhdisteet ovat erittäin voimakkaasti riippuvia öljyn ja paperin kosteuskonsentraatiosta sekä niiden lämpötilasta [30]. Lisäksi furfuraali-yhdisteiden tuotanto riippuu hapen määrästä, kyseisestä muuntajasta [31], näytteenotto paikasta ja näytteenottoa edeltäneestä ajasta suhteessa paperin hajoamiseen [16] sekä myös itse paperista [12]. Edeltävistä syistä ja siitä, että furfuraali-yhdisteiden muodostumisreaktioita ja kehittymistä pitkällä aikavälillä ei tunneta riittävän hyvin, furfuraaliyhdisteitä ei voida yksinään käyttää täysin luotettavana indikaattorina eristeen kunnosta tai sen DP-luvun muuttumisesta [12][31].

Öljyimpregnoidun paperin hajoaminen eli selluloosan tuhoutuminen ja pilkkoutuminen pienemmiksi ketjuiksi on riippuvainen siihen vaikuttavista ympäristöoloista ja muuntajan toiminnasta. Selluloosan ikääntymiseen ja hajoamiseen vaikuttavat useat eri muuttujat, mutta sille on tunnistettu kolme eri hajoamismekanismia: hydrolyysi, pyrolyysi ja hapettuminen. [12][15]

Kuvassa 2 on esitetty eristeiden ikääntymistä nopeuttavien tekijöiden yhteys eri hajoamismekanismeihin muuntajan eristemateriaaleissa ja niistä syntyviä sivutuotteita. Kuva 2 ei välttämättä edusta kaikkia mahdollisia hajoamiseen liittyviä prosesseja ja yhdisteitä täydellisesti, mutta sen tarkoituksena on antaa hyvä kokonaiskuva tärkeimpien hajoamismallien yhteyksistä ja merkittävimmistä tekijöistä.

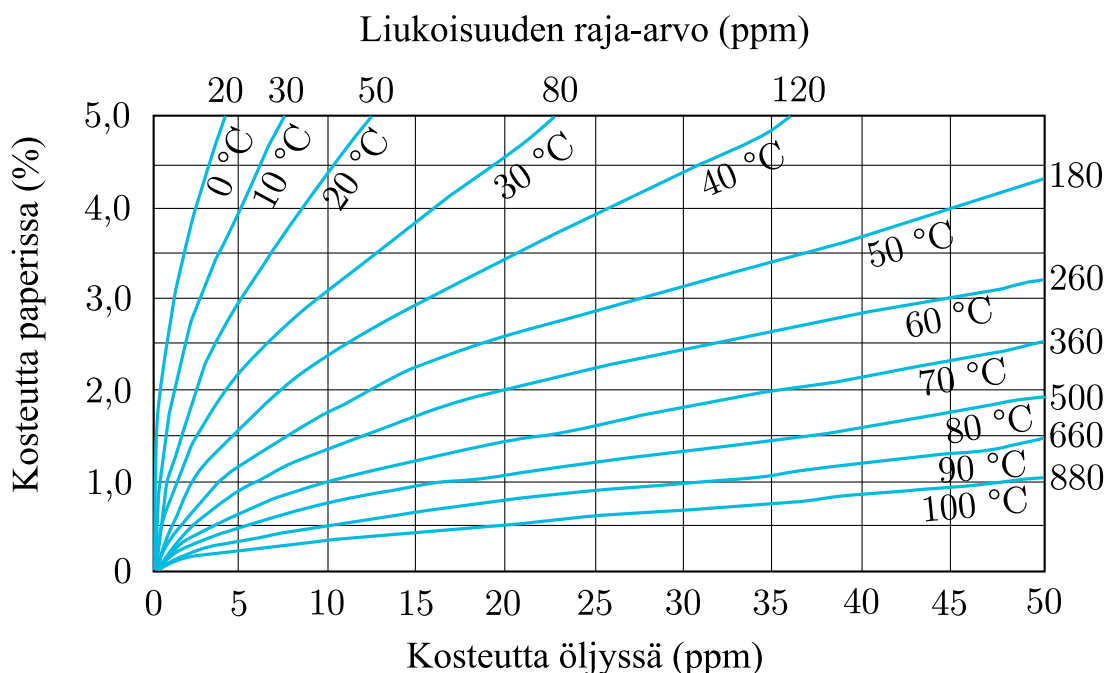
Hydrolyysi on katalyyttinen prosessi, jonka reaktionopeus riippuu nesteen happamuudesta eli  $\text{H}^+$ -ionien määrästä, jotka yksinkertaisemmin sanottuna ovat protoneja.  $\text{H}^+$ -ionit esiintyvät myös  $\text{H}_3\text{O}^+$ -ioneina, sillä ne yhdistyvät välittömästi vesimolekyyleihin kohdattaessa niitä. [12][32] Kaikista merkittävimmät happamat yhdisteet ikääntymisen nopeuden kannalta ovat matala molekyylipainoiset karboksyylihapot [32][33]. Nykystandardeissa karboksyylihapojen määrää ei oteta erityisesti huomioon niiden merkityksellisyydestä huolimatta. Sen sijaan muuntajalle tehtävissä happoisuuden testeissä keskitytään kokonaishappamuuslukemaan (*Total Acid Number, TAN*), joiden kehittymistä voidaan myös käyttää merkinä eristeiden vanhenemisesta. [32][34][35] Karboksyylihapot ovat merkittäviä selluloosan ikääntymisen kannalta, sillä niistä vapautuvat  $\text{H}^+$ -ionit pääsevät selluloosan



Kuva 2: Kaavio eristeiden ikääntymistä nopeuttavien tekijöiden yhteys eri hajoamismekanismeihin muuntajan eristemateriaaleissa ja niistä syntyviä sivutuotteita [11][12][19][32, mukaillen].

amorfisiin alueisiin hajoittamaan selluloosan rakennetta [32]. Hydrolyysissä kosteus ja kemialliset reaktiot öljyssä muodostavat happopitoisia yhdisteitä, jotka heikentävät paperieristettä. Kemialliset reaktiot aiheuttavat selluloosaketjujen pilkkoutumista pienemmiksi selluloosaketjuiksi ja aiheuttavat myös hajoamisen sivutuotteita. Koska hydrolyysin tuottamiin sivutuotteisiin kuuluu hydrolyysireaktiota katalysoivat vesi ja hapot, hydrolyysi on itseään kiihdyttävä hajoamismekanismi. Hydrolyysin sivutuotteena syntyy myös furfuraldehydi-yhdisteitä. [12][32] Hydrolyysi on vallitseva hajoamismekanismi muuntajan toimiessa sen toimintalämpötila-alueen yläpäässä [32]. Kosteus muuntajassa arvioidaan usein kaikista merkittävämmäksi ikääntymistä kiihdyttäväksi tekijäksi [36]. Veden ilmentyminen muuntajan sisällä itsessään ei aiheuta rappeutumisen nopeutumista, vaan se edistää

hapon rapauttavaa vaikutusta ja siksi nopeuttaa ikääntymisprosessia [12]. On tosin huomioitava myös se, että kosteus alentaa eristeiden läpilyöntilujuutta, mikä voi aiheuttaa läpilyöntejä ja oikosulun eristeissä [37]. Muuntajassa esiintyvälle kosteudelle on havaittu olevan ominaista se, että suurin osa kosteudesta imeytyy öljyimpregnoituun paperiin ja vain murto-osa siitä on öljyyn liuenneena [4]. Paperin ja muuntajaöljyn kosteuden suhteet ja arvot ovat myös riippuvaisia vallitsevasta lämpötilasta kuvassa 3 esitetyn kuvaajan mukaisesti [38][39]. Ensimmäisiä kyseisen yhteyden havaitsijoita olivat Fabre ja Pichon, joiden muodostamaa kosteuskäyrä-kaaviota onkin siteerattu useissa eri artikkeleissa ja kirjallisuudessa [38]. Myöhemmin monet muut pyrkivät parantamaan kosteuskäyrien mallia [38] kuten myös Oommen, joka kehitti oman tulkintansa kosteuskäyrien käyttäytymisestä [39]. Oommenin mallin on kokeellisesti havaittu olevan parhaiten soveltuva kuvaamaan tasapainotilassa olevan muuntajan kosteuskäyriä [38].



Kuva 3: Kuvaaja Oommenin mallin mukaisesta öljyimpregnoitun paperin ja muuntajaöljyn välisestä kosteustasapainosta [38][39, mukaillen].

Pyrolyysi on prosessi, jossa hajoamiseen ei vaadita vettä, hapetta eikä minkäänlaista katalyyttiä sen aloittamiseksi [32]. Pyrolyysissa korkea lämpötila itsessään aiheuttaa selluloosarakenteen hajoamisen [12]. Tavanomaisissa muuntajien toimintalämpötiloissa tai ylikuormituksen aikana eli alle +140 °C, pyrolyysin vaikutus on pieni [32]. Pyrolyysin sivutuotteina syntyy vettä, happoja, furfuraaliyhdisteitä [32], hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) ja hiilimonoksidia ( $\text{CO}$ ) [12][32].

Hapettuminen on kolmas todettu selluloosan hajoamismekanismi. Hapettumista katalysoivat vapaat hydroksyyli-radikaalit  $\text{HO}^\bullet$ , jotka muodostuvat vetyperoksidin ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ja hydroperoksidien ( $\text{ROOH}$ ) hajoamistuotteena. Vetyperoksidit taas muodostuvat veden ja hapen reaktiona, jota katalysoivat öljyssä vapaana liikkuvat metalli-ionit kuten  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  ja  $\text{Fe}^{3+}$ . [12][32] Käytössä olevissa muuntajissa on havaittu matalan happipitoisuuden



(alle 2000 ppm) vaikuttaneen hidastavasti paperin hajoamiseen [12], mutta laboratoriotesteissä selluloosan hajoamisnopeus on ollut korkeintaan kaksinkertainen happipitoisessa ympäristössä verrattuna hapettomassa tilassa tehtyyn kokeeseen [32]. Tästä syystä puhtaan hapen tuomaa vaikutusta reaktiota kiihdyttävänä tekijänä on epäilty [32].

Muuntajan eristepaperin hajoamisen lisäksi myös muuntajassa käytettävä muuntaöljy ikääntyy ja hajoaa [12]. Öljyn pääasiallinen ikääntymisen mekanismi on sen hapettuminen [12], jonka seurauksena öljyn läpilyöntilujuus sekä suorituskyky heikkenevät [1][40]. Korkea lämpötila, veden määrä ja kosteus öljyssä, happipitoisuus ja öljyssä vapaina liikkuvien metallipartikkelien sekä metalli-ionien määrä vaikuttavat kiihdyttävästi öljyn ikääntymiseen ja hajoamiseen. Hapettuminen tapahtuu lämmön ja hapen yhteisvaikutuksesta, jota katalysoivat voimakkaasti myös metallihiukkaset ja metalli-ionit. [1][32] Hiilivety-molekyylit öljyssä hapettuvat lämmön vaikutuksesta radikaaleiksi peroksi-yhdisteiksi, jotka muodostuvat hydroperoksideiksi ja vetyperoksidiksi ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Muodostuneet peroksidit muodostavat uusia radikaaleja ja hapettumisen sivutuotteita. Radikaalit ovat hyvin reaktiivisia ja muodostavat uusia radikaaleja jatkaen hapettumisreaktiota. [32] Muuntajaöljyn hapettumisen sivutuotteena syntyy paljon erilaisia yhdisteitä öljyyn, joista ikääntymisen kannalta merkittäviä ovat: vesi, karboksyylihapot, hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), hiilimonoksidi ( $\text{CO}$ ) ja vetyperoksidi ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). [32] Lisäksi eristeöljyn rappeutumisen sivutuotteena voi syntyä öljyyn liejuckerrostuma (*sludge*) eli öljyyn liukenematon yhdiste [32]. Liejuckerrostuman joutuessa kosketuksiin eristepaperin kanssa se voi heikentää lämmönjohtumista eristepaperista pois päin ja aiheuttaa siitä syystä selluloosan lämpötilan kasvua ja sitä kautta ikääntymisen kiihtymistä [12]. Öljyn hapettumista voidaan hidastaa lisäämällä öljyyn antioksidantteja, jotka reagoivat hapettumisessa syntyvien radikaalien kanssa ja vähentävät peroksidien syntyä. Antioksidantit voivat myös vaeltaa (*migrate*) öljystä selluloosaan ja vähentää peroksidien muodostumista selluloosassa, hidastaen selluloosan ikääntymistä. [32] Suurin osa öljyyn liuenneista hiilivety-yhdisteistä on öljyn rappeutumisen sivutuotteita, mutta ainakin osan öljyyn liuenneista hiilivety-yhdisteistä uskotaan olevan peräisin paperin hajoamisesta [12].

Muuntajan eristeiden ikääntymisnopeutta arvioidessa, useimmiten keskitytään lämpötilaan sekä kosteuden ja hapen määrään muuntajassa. Nykyisillä öljyn konservaattori järjestelmillä (*preservation system*) on mahdollista minimoida kosteuden ja hapen määrä muuntajassa jättäen jäljelle ikääntymisen nopeuteen vaikuttavaksi tekijäksi lämpötilan vaihtelun. [27] On tosin muistettava, että kosteutta ja happea ei todennäköisimmin pystytä kokonaan eliminoimaan muuntajasta. Muuntajan lämpötilaa tarkasteltaessa on syytä huomata, että muuntajan rakenteen ja suuren koon vuoksi sen sisälämpötila ei voi jakautua tasaisesti. Tästä syystä muuntajan ikääntymisessä tarkastellaan useimmiten niin kutsuttuja korkeimman lämpötilan omaavia kuumia pisteitä (*hot-spot*, *hottest-spot*), jotka luonnollisesti ikääntyvät ja rappeutuvat kaikista voimakkaimmin. [27] Ensimmäisiä muuntajan ikääntymistä kuvaavia malleja oli Montsingerin sääntö, jonka mukaan muuntajan eristeiden ikä puolittuu jokaista  $8^\circ\text{C}$  lämpötilan nousua kohden [41]. Myöhemmin havaittiin, että ikääntyminen voidaan sovittaa Arrheniuksen yhtälöön [42] ja välttää Montsingerin säännön epäpätevyys eri lämpötilaalueilla [27][43]. Arrheniuksen yhtälö on yleinen yhtälö, joka kuvaa hyvin useimpien kemiallisten reaktioiden reaktionopeutta suhteessa lämpötilan muutokseen [44]. IEC:n ja IEEE:n kuormitusoppaat käyttävät molemmat Arr-

heniuksen yhtälöstä johdettua ikääntymisen yhtälöä [27][45]. IEEE:n oppaan mukaan eristeiden ikääntymistä voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$PerUnitLife = Ae^{\left[ \frac{B}{\theta_H + 273} \right]}, \quad (1)$$

missä  $PerUnitLife$  on eristeen eliniän yksikköön suhteutettu kerroin,  $\theta_H$  on käämityksen kuumimman pisteen (*hot-spot*, *hottest-spot*) lämpötila celsius-asteina,  $A$  on vakio,  $B$  on vakio ja  $e$  on luonnollinen logaritmi.  $PerUnitLife$  ilmaisee käytännössä ikääntymisen eristeen normaalin iän yksikköä kohden. IEEE:n kuormitusoppaassa on kerättyä erilaisia tutkimukseen perustuvia arvoja vakioille, mutta opas suosittelee tavanomaiselle muuntajalle  $B$ :n arvoksi 15000 ja  $A$ :n arvoksi  $9,8 \times 10^{-18}$ . Tavanomainen muuntajan kuumimman pisteen lämpötila normaalikuormituksella on noin  $110^\circ\text{C}$ . [27]

Ikääntymisen arviointiin käytetyt vakiot riippuvat paljolti käytettävästä eristeen käyttöiän loppumisen (*end-of-life*, *EOL*) kriteereistä [27]. Ne perustuvat myös siihen oletukseen, että muuntajassa tapahtuvan ikääntymisreaktion aktivointienergia pysyy samana, mutta oikeassa muuntajassa näin ei välttämättä ole. Selluloosan hajoamismekanismit (hydrolyysi, pyrolyysi ja hapettuminen) ja öljyn rappeutuminen tapahtuvat todellisessa käytössä olevassa muuntajassa yhtäaikaaisesti ja kontribuoivat toistensa reaktionopeuksiin kiihdyttävästi ja vaikuttavat ikääntymisreaktioiden aktivoitumisenergioihin. Tämä tekee eristeiden ikääntymisen arvioinnista ja ennusteiden luonnista hyvin vaikeaa. Ikääntymisen mallinnusta vaikeuttaa myös se, että kaikkia tapahtuvia reaktioita ja hajoamismekanismeja ei tunneta yksityiskohtaisesti. [12] Kuten aiemmasta kuvasta 2 voidaan nähdä, muuntajaöljyn ja öljyimpregnoidun paperin ikääntymisen ja muuntajaöljyn rappeutumisen nopeuteen vaikuttaa useita eri tekijöitä ja muuttujia. Kaikentyyppiset rasitukset vaikuttavat negatiivisesti eristeiden kuntoon. Esimerkiksi sähköpurkaukset ja valokaaret muuntajan sisällä, mekaaniset rasitukset, kuten muuntajan värinä, oikosulkuvirtojen ja ylijännitteiden käämityksiin kohdistavat voimat ja ylikuumeneminen sekä muut ongelmat muuntajassa aiheuttavat vikatilanteita ja rasittavat eristeitä. [22] Yksi viimeaikaisia havaintoja muuntajan vianaiheuttajista on kuparisulfidin muodostuminen käämitysten kuparin pinnalla. Muodostunut kuparisulfidi pääsee kulkemaan paperiin, mikä voi johtaa paikalliseen eristeen pettämiseen ja oikosulkuun sekä vikatilanteeseen. [46]

## 2.2 Liuenneet kaasut muuntajaöljyssä

### 2.2.1 Kaasujen liukeneminen öljyyn

Muuntajassa tapahtuvat viat ja normaali ikääntyminen vapauttavat muuntajan sisällä kaasuja rikkomalla öljyssä ja paperissa olevien hiilivetyketjujen sidoksia. Jäljelle jääneet epästabiilit radikaalit ja ionit muodostavat kemiallisten reaktioiden seurauksena kaasumolekyylejä [47]. Kaasut diffusoituvat muuntajan suljetussa tilassa, jolloin ne jakaantuvat tasaisesti vapaana olevaan kaasutilavuuteen ja liukenevat öljyyn. Henryn lain (*Henry's law*) mukaan kaasujen liukenevuus nesteessä on suhteellinen kaasun osapaineeseen, kun tasapainotila on saavutettu tietyssä lämpötilassa [48]. Henry'n laki on liukenevuutta rajoittava laki [49], mutta sitä voidaan käyttää myös kaasukonsentraation laskemiseen nesteessä tai

kaasussa kun toinen näistä tunnetaan [48]. Henryn laki vakiolämpötilassa voidaan ilmaista yleisesti:

$$P_G = K_H X_G, \quad (2)$$

missä  $P_G$  on kaasun osapaine,  $K_H$  on Henryn lain vakio ja  $X_G$  on mooliosuuden liukoisuus (*mole fraction solubility*) [49]. Henryn laki voidaan esittää myös seuraavissa muodoissa laimeille kaasulioksille:

$$P_G = K_2 C_L, \quad (3)$$

$$C_G = K_i C_L, \quad (4)$$

missä  $K_2$  on liukoisuusvakio ja  $K_i$  on Henryn lain mukainen liukoisuuskerroin,  $C_L$  on kaasun konsentraatio nesteessä ja  $C_G$  on kaasun konsentraatio kaasussa [50]. Ostwaldin kerroin on toisenlainen määritelmä kaasun liukoisuudelle [51]. Ostwaldin kerroin (*Ostwalds coefficient*) on Henryn lain pätiessä ja vakiolämpötilassa sekä 1 atm osapaineessa sama kuin kerroin  $K_i$  [48]. Kun kaasu oletetaan ideaaliseksi ja Henryn lain pätiessä Ostwaldin kerroin ei riipu kaasun osapaineesta, mutta käytännössä on tarpeellista ilmoittaa lämpötila ja kokonaispaine, sillä Ostwaldin kerroin on määritelty vakiolämpötilassa ja on lämpötilariippuvainen [49]. Ostwaldin kertoimille on olemassa erilaisia määritelmiä. Tämän työn kannalta noudetaan seuraavia määrittelyitä joiden mukaan: Ostwaldin kerroin liuksen tilavuudelle on saturoituneen liuksen nestetilavuuden ja siihen liukenevan kaasun tilavuuden suhde määritellyssä paineessa ja lämpötilassa. Ostwaldin kerroin konsentraatioille on määritelty kaasun konsentraatioiden suhteelle nestefaasissa ja kaasufaasissa. [51] Koska nämä kertoimet ovat yhtenevät Ostwaldin kerroin eli liukoisuuskerroin voidaan määritellä seuraavasti:

$$L = \frac{C_L}{C_G} = \frac{V_G}{V_L}, \quad (5)$$

missä  $L$  on Ostwaldin kerroin,  $C_L$  ja  $V_L$  ovat kaasun konsentraatio ja tilavuus nesteessä ja vastaavasti  $C_G$  ja  $V_G$  ovat kaasun konsentraatio ja tilavuus kaasussa [50][51]. Täten kun Ostwaldin kerroin on määritelty, voidaan yhtälöä 5 käyttämällä laskea tiedettyjen tilavuuksien suhteen ja kaasutilavuuden tai nestetilavuuden konsentraation avulla konsentraatio toisessa. Ostwaldin kerroin ja muut liukoisuuskertoimet ovat riippuvaisia paineesta ja lämpötilasta sekä myös itse käytettävästä öljystä [48]. Paineriippuvuus muuntajissa ei ole merkittävä ongelma, sillä paine pysyy suhteellisen tasaisena vapaasti hengittävissä muuntajissa konservaattorijärjestelmien avulla. Poikkeuksena muuntajat, joita ei ole varustettu konservaattorijärjestelmällä ja jotka eivät ole vapaasti hengittäviä. Kuormituksen muutoksesta tai ympäristön lämpötilasta aiheutuvat lämpötilan muutokset aiheuttavat nesteen laajenemista ja siten paineen vaihtelua muuntajan sisällä, etenkin suljetuissa muuntajissa. Muuntajaöljyn laajenemiskerroin on kuitenkin suhteellisen pieni (noin  $0,00075 \frac{1}{^\circ C}$ ) [48]. Lämpötilariippuvuuden takia on syytä muistaa, että kertoimet muuttuvat eri lämpötiloissa ja tästä syystä on tarpeellista määritellä missä lämpötilassa kaasuja mitataan. Sen vuoksi

myös standardeissa on määritelty eri kaasuille liukenemiskertoimia eri lämpötiloissa. Taulukossa 1 on esitetty eri lähteistä kerättyjä Ostwaldin kertoimia, jotka on mitattu taulukossa esitetyissä eri lämpötiloissa.

Taulukko 1: Ostwaldin kertoimet ( $L$ ) eri lämpötiloissa eri lähteiden mukaan [5][47][48][52][53].

| Kaasu                         | $L$ (liukoisuuskertoimet) |          |          |          |        |        |        |
|-------------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
|                               | Cigré                     | IEC60567 | IEC60599 | IEC60599 | IEEE   | Oommen | Oommen |
|                               | 20 °C                     | 20 °C    | 20 °C    | 50 °C    | 25 °C  | 25 °C  | 60 °C  |
| H <sub>2</sub>                | 0,0504                    | 0,04     | 0,05     | 0,05     | 0,0429 | 0,056  | 0,077  |
| O <sub>2</sub>                | 0,172                     | 0,13     | 0,17     | 0,17     | 0,138  | 0,179  | 0,198  |
| N <sub>2</sub>                | 0,091                     | 0,07     | 0,09     | 0,09     | 0,0745 | 0,097  | 0,119  |
| CO                            | 0,125                     | 0,1      | 0,12     | 0,12     | 0,102  | 0,133  | 0,152  |
| CO <sub>2</sub>               | 1,1                       | 0,93     | 1,08     | 1,0      | 0,9    | 1,17   | 0,982  |
| CH <sub>4</sub>               | 0,423                     | 0,34     | 0,43     | 0,4      | 0,337  | 0,438  | 0,426  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 1,25                      | 1,0      | 1,20     | 0,9      | 0,938  | 1,22   | 1,06   |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,81                      | 1,47     | 1,70     | 1,4      | 1,35   | 1,76   | 1,42   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 2,88                      | 2,18     | 2,40     | 1,8      | 1,99   | 2,59   | 1,97   |

Taulukossa 1 esitetyistä kertoimista voidaan helposti nähdä, että hiilivety-yhdisteet liukenevat suhteellisen hyvin muuntajaöljyyn verrattuna yksimolekyyliisiin yhdisteisiin, jotka liukenevat heikosti. Taulukosta 1 havaitaan myös selkeästi lämpötilan muutoksen vaikutus liukoisuuskertoimiin, esimerkiksi IEC60599 standardin esittämässä kertoimissa. Lisäksi taulukosta voidaan havaita, että ilmoitettujen liukoisuuskertoimien suuruusluokka on yleensä samassa lämpötilassa ja samalla kaasulla samaa kerroinluokkaa, mutta ei täysin yhtenevä. Valitettavasti alan kirjallisuudessa ei ole selkeää yhteisymmärrystä liukoisuuskertoimien tarkoista arvoista eri kaasuille eri lämpötiloissa, vaan määritellyt kertoimet voivat vaihdella huomattavasti [5][47][48][52][53]. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että liukoisuuskertoimet muuttuvat selkeästi riippuen öljystä ja öljyn tiheydestä, mikä luonnollisesti vaikuttaa mitattuihin liukoisuuskertoimiin. Tämän vuoksi olisi erittäin hyödyllistä ja toivottavaa, että öljyn valmistajat pyrkisivät analysoimaan ja mittaamaan liukoisuuskertoimet valmistamistaan öljyistä standardoidulla tavalla.

Mineraaliöljyt koostuvat yleisesti pääasiassa kolmesta perusmolekyyliarakenteesta: parafinisista, naftenisista ja aromaattisista rakenteista. Parafiniset rakenteet muodostuvat haaroittuneista tai suorista hiilivetyketjuista. Nafteniset rakenteet muodostuvat useista hiilivetyrenkaista. Aromaattiset rakenteet muodostuvat aromaattisista hiilivetyrenkaista, joilla on vuorotellen kaksois- ja yksöissidoksia. Mineraaliöljyt luokitellaan öljyssä olevien parafinisten, naftenisten ja aromaattisten rakenteiden määrän mukaan. Muuntajaöljyt luokitellaan parafinirakenteiden määrän mukaan nafteniseksi tai parafiniseksi muuntajaöljyksi. Nafteniset (*naphthenic*) muuntajaöljyt sisältävät alle 50 % parafinisia rakenteita ja parafiniset (*paraffinic*) muuntajaöljyt sisältävät yli 56 % parafinisia rakenteita. [54]

Erityyppisiä öljyjä on usein mahdollista yhdistää, jolloin niiden sekoituksen ominaisuudet ovat sekoitettavien öljyjen ominaisuuksien väliltä [55]. Esitettyjen öljytyypin määrittelyrajojen välillä olevia öljyjä voidaan kutsua sekoitetuiksi öljyiksi. Taulukossa 2 on esitetty eri lähteistä kerättyjen erityyppisten öljyjen liukoisuuskertoimia, jotka ovat mitattu +70 °C lämpötilassa.

Taulukko 2: Ostwaldin kertoimet ( $L$ ) eri öljyissä eri lähteiden mukaan ja eri öljylajikkeiden mukaan, +70 °C lämpötilassa [47][53] [56].

|                               | $L$ (liukoisuuskertoimet) |          |              |                |          |             |             |
|-------------------------------|---------------------------|----------|--------------|----------------|----------|-------------|-------------|
|                               | ASTM                      | IEC60567 | Jalbert      | Jalbert        | IEC60567 | Jalbert     | Jalbert     |
|                               | Voltesso 35*              | *        | Voltesso 35* | Shell Diala B* | †        | Univolt 52† | Drakeol 35† |
| H <sub>2</sub>                | 0,074                     | 0,074    | 0,093        | 0,085          | 0,036    | 0,111       | 0,07        |
| O <sub>2</sub>                | 0,17                      | 0,17     | 0,206        | 0,205          | 0,18     | 0,263       | 0,147       |
| N <sub>2</sub>                | 0,11                      | 0,11     | 0,121        | 0,133          | 0,12     | 0,152       | 0,082       |
| CO                            | 0,12                      | 0,073    | 0,146        | 0,132          | 0,073    | 0,157       | 0,094       |
| CO <sub>2</sub>               | 1,02                      | 0,64     | 0,936        | 0,865          | 0,64     | 0,878       | 0,724       |
| CH <sub>4</sub>               | 0,44                      |          | 0,446        | 0,409          |          | 0,427       | 0,319       |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,93                      | 0,93     | 1,076        | 0,898          | 0,89     | 0,981       | 0,707       |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,47                      | 1,47     | 1,456        | 1,346          | 1,27     | 1,372       | 1,116       |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 2,09                      | 2,09     | 2,068        | 1,947          | 1,73     | 1,918       | 1,62        |

\* Nafteeninen öljy

† Paraffininen öljy

Taulukosta 2 voidaan helposti erottaa liukoisuuskertoimien erot eri öljyalaaduille, kun vertaillaan nafteenista tai parafeenista muuntajaöljyä. Erot ovat esimerkiksi IEC60567 ilmoittamien kertoimien mukaan jopa kaksinkertaisia vetykaasun suhteen. Taulukosta 2 nähdään myös, että eri öljyvalmistajien öljyissä on eroa, esimerkkinä Voltesso 35 verrattuna Shell Diala B:hen. Lisäksi on mahdollista havaita selkeät erot eri lähteiden mittauksissa. Jalbertin artikkeli [56] ilmoittaa Voltessa 35 öljylle hyvin erilaiset liukoisuuskertoimet verrattuna ASTM D3612 standardin mittauksiin [57]. Taulukosta 2 voidaan myös todeta eroja eri lähteiden ilmoittamissa liukoisuuskertoimissa, jotka voivat mahdollisesti johtua käytetyistä menetelmistä tai mittausepävarmuudesta. Tavanomaisten öljyjen ryhmittelyn nafteenisiin ja paraffinisiin öljyihin lisäksi muuntajaöljyt voidaan eritellä öljyihin, jotka eivät sisällä inhibiittoreita (*uninhibited oils*), osittain inhibioituihin öljyihin (*partially inhibited oils*) ja täysin inhibioituihin öljyihin (*fully inhibited oils*) [58]. Inhibiittoreiden lisäyksen tarkoituksena on hidastaa öljyn oksidoitumista ja ikääntymistä.

Muuntajan sisällä vapautuneet ja öljyyn liuenneet kaasut on mahdollista yhdistää eri vikatilanteisiin ja selvittää niiden perusteella muuntajassa tapahtuneita vikatilanteita tai kehittyviä vikoja. Eri viat johtavat erilaisiin kaasukoostumuksiin ja vian vakavuus tai suuruus vaikuttaa kaasujen muodostumisnopeuteen. [4] Liuenneiden kaasujen analyysi on suositteluihin kunnonvalvontakeinoja ja huoltotoimenpiteitä useimmissa eri tilanteissa, kuten: käyttöönotto, käytönaikana, suoja-alueen laukeamisen jälkeen systeemivian takia ja

suojareleen laukeamisen jälkeen sisäisen vian takia [59]. Liuenneiden kaasujen analyysin suosio standardien suosittelemana kunnonvalvontakeinona voi johtua mahdollisesti siitä, että sen avulla on mahdollista tutkia hyvin laajasti monia erilaisia vikatilanteita yhdellä kunnonvalvonnan tutkintamenetelmällä. Monet kunnonvalvonnan työkalut ja menetöt ovat hyvin erikoistuneita tietynlaisten vikojen tutkintaan ja eivät useimmiten pysty kertomaan paljoa kokonaiskuvasta. [1][7][59] Muuntajille suoritettussa liuenneiden kaasujen analyysissä tutkitaan tiettyjä öljyyn liuenneita kaasuja, jotka pystytään yhdistämään erilaisiin vikoihin ja tapahtumiin muuntajan toiminnassa. Tämän vuoksi niitä voidaan käyttää muuntajan kunnon arviointiin. [4] Muuntajan liunneiden kaasujen analyysissä tutkittavat kaasut [47][5] on esitetty taulukossa 3 ja ne on järjestetty ryhmiin kaasutyypin mukaan.

Taulukko 3: Liuenneiden kaasujen analyysissä tunnistettavat kaasut ja niiden kemialliset kaavat [5][47] jaoteltuina ryhmiin [60].

| Ryhmä                   | Kaasu          | Kemiallinen kaava             |
|-------------------------|----------------|-------------------------------|
| Hiilivedyt ja vetykaasu | Vety           | H <sub>2</sub>                |
|                         | Metaani        | CH <sub>4</sub>               |
|                         | Asetyleeni*    | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|                         | Etyyleeni†     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |
|                         | Etaani         | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
| Hiilioksidit            | Hiilimonoksidi | CO                            |
|                         | Hiilidioksidi  | CO <sub>2</sub>               |
| Ei-vikakaasut           | Happi          | O <sub>2</sub>                |
|                         | Typpi          | N <sub>2</sub>                |

\* Systemaattinen kemiallinen nimi, etyyni

† Systemaattinen kemiallinen nimi, eteeni

Hiilivety-yhdisteet ja vetykaasu voidaan luokitella niin kutsuttuihin vikakaasuihin (*fault gases*), joiden kasvava muodostuminen viittaa usein jonkinlaiseen vikaan muuntajassa. Hiilioksidit yhdistetään useimmiten selluloosan ja öljyn ikääntymiseen, mutta luonnollisesti niiden muodostumisnopeuden ollessa huomattava, se voi usein viitata jonkinlaiseen termiseen vikaan käämityksissä tai ylikuumenemiseen [58]. Ei-vikakaasuihin (*non-fault gases*) voidaan luokitella typpi ja happi. Ei-vikakaasut, nimensä mukaisesti, eivät yleensä viittaa suoraan mihinkään vikaan itsessään, vaan sen sijaan ne ovat kaasuja, joita voi yleisesti esiintyä liuenneena muuntajaöljyyn ja ovat toisista syistä merkityksellisiä. Liuenneiden kaasujen analyysissä tärkeät kaasut voidaan myös jaotella palaviin kaasuihin (*combustibles*) [5], jotka ovat normaalipaineessa ja lämpötilassa palavia kaasuja. Palaviin kaasuihin kuuluvat: vety, metaani, asetyleeni, etyleeni, etaani ja hiilimonoksidi [5]. Palavien kaasujen kokonaismäärää (*Total Combustible Gases, TCG*) käytetään usein hyväksi tulkinnassa ja niiden kasvu muuntajassa ylipäättänsä voi ilmaista jonkinlaista vikaa [5].

Liuenneiden kaasujen analyysissä mitattava palavien kaasujen kokonaismäärän konsentraatio (*Total Dissolved Combustible Gases, TDCG*) on mitattavissa öljystä ja sen kasvua tai sallittavien rajojen ylitystä käytetään usein vikaa ilmoittavana tekijänä [5]. Taulukossa 3 esitettyjen kaasujen lisäksi on ollut ehdotuksia C<sub>3</sub> hiilivetyjen tutkimisesta, joita

voitaisiin mahdollisesti käyttää hyväksi liuenneiden kaasujen analyysin lisätukena [47]. Useimmissa alalla käytetyissä vikatulointamenetelmissä ja standardeissa niitä ei oteta huomioon [5][47], mutta kaasunäytteiden otossa ne kuitenkin huomioidaan osana standardien käsittelemiä metodeja. Standardien mukaisia analyysimetoodeja käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.3 [53][57].  $C_3$  hiilivetyjen tutkimista ja näytteenottoa vaikeuttaa niiden voimakas liukoisuus öljyyn. Tästä syystä ne eivät välttämättä aiheuta ongelmia muiden kaasujen mittauksessa öljystä ja ne jätetään huomiotta monessa analyysimenetelmässä [47][53].

### 2.2.2 Kaasujen muodostuminen ja vikatyypit

Ilmakehässä on hyvin korkeat pitoisuudet happea ja typpeä sekä merkittäviä pitoisuuksia hiilidioksidia (typpi 78 %, happi 21 %, Hiilidioksidi 380 ppm) [61]. Happipitoisuuden yllättävä kasvu voi johtua vuodosta konservaattorissa tai muualla muuntajan rakenteissa [47], mikä on huolestuttavaa, sillä korkeiden happipitoisuuksien on havaittu kiihdyttävän eristeiden ikääntymistä. Yli 2000 ppm pitoisuuksien on havaittu kiihdyttävän ikääntymistä voimakkaasti [12][22][34]. Happipitoisuuden yllättävä lasku voi kuitenkin myös olla huolestuttavaa muuntajan kannalta, sillä se voi viitata voimistuneeseen oksidoitumisreaktioon, joka kuluttaa happea aiempaa voimakkaammin [62].

Typpikaasua voi tulla muuntajaan sisään vuotavan ilman kautta. Typpipaineistetuissa (*nitrogen blanketed*) muuntajissa sitä on myös paineistettuna muuntajan sisällä. Typpipaineistetuissa muuntajissa öljy saturoituu lähinnä tyyppästä ja hiilidioksidin ja hapen pitoisuudet jäävät pieniksi. [58] Öljyyn liennut typpikaasu ei siis itsessään liity vioista tai ikääntymisestä muodostuviin kaasuihin. Typen pitoisuuden kasvu muuntajassa voi kuitenkin viitata vuotoon muuntajassa varsinkin, jos havaitaan tasapainotilanteessa hapen ja typen suhteen ( $O_2 / N_2$ ) olevan lähellä 0,5 [47].

Hiilimonoksidia syntyy öljyn ja selluloosan ikääntymisen sivutuotteena. Hiilimonoksidin muodostumisnopeus on voimakkaampi, kun järjestelmässä on myös paljon happea verrattuna järjestelmään, jossa happipitoisuus on pienempi. Toinen lähde hapelle on kosteus selluloosassa. [31] Hiilimonoksidin pitoisuus ilmakehässä on yleensä hyvin pieni. Se myös liukenee heikosti öljyyn [58], joten vuodot muuntajan rakenteessa tai konservaattorissa voivat selittää vain hyvin pieniä hiilimonoksidin pitoisuuksien kasvuja. Varsinkin siitä syystä, että hiilimonoksidi tavanomaisesti pakenee ilmakehään avoimen konservaattorin kautta [58]. Hiilimonoksidin ja hiilidioksidin suuren muodostumisnopeuden tai konsentraation havaitseminen yleensä liitetään paperieristeeseen liittyvään vikaan, joka myös voimistuu lämpötilan kasvaessa [47][58]. Suuria määriä hiilidioksidia ja hiilimonoksidia voi syntyä esimerkiksi ylikuumentuneesta selluloosasta. Ylikuumentunut selluloosa tuottaa myös metaania ja etyleeniä, mutta tuotetut pitoisuudet ovat huomattavasti matalampia verrattuna tuotettujen hiilioksidien pitoisuuksiin. [5] Jos öljyssä ei havaita asetyleenin tuotantoa, mikä viittaisi vakavaan ja korkean lämpötilan aiheuttavaan vikaan, hiilimonoksidin voidaan yleensä olettaa muodostuvan lähinnä muuntajaöljyn rappeutumisesta. Hiilimonoksidin kasvanut tuotanto antaa myös paljon aiemmin selkeitä viitteitä öljyn ikääntymisestä korkeassa lämpötilassa, kuin muut kaasut ( $CH_4$ ,  $C_2H_4$  ja  $C_2H_6$ ) joiden luotettavaan mittaukseen vaaditut tasot kehittyvät huomattavasti hitaammin. [58] Hiilimo-

noksidin ja hiilidioksidin tuotannon on havaittu olevan merkittävästi pienempää, kun öljy sisältää inhibiittoreita (*inhibited oil*) [58].

Hiilidioksidi on pääasiassa selluloosan ikääntymisen tuote, vaikka sitä syntyykin pieniä määriä myös öljyn hapetumisesta [58][31]. Öljyyn lisätyt inhibiittorit lyhentävät alussa tapahtuvan voimakkaan hiilidioksidin muodostumisen aikavälin pituutta. Hiilidioksidin tuotanto kuluttaa voimakkaasti happea ilmarikkaista järjestelmistä, jonka vuoksi vapaasti hengittävissä tai paljon happea sisältävissä järjestelmissä hapen kulutus korreloi voimakkaasti hiilidioksidin tuotantoa. Hapen vaihtoehtoinen lähde hiilidioksidin tuotantoon on paperiin imeytynyt kosteus, joka kuitenkin reagoi heikommin hiilidioksidin tuotantoon. [31]

Hiilidioksidin ja hiilimonoksidin absoluuttipitoisuuksia tehokkaampi metodi vikatilanteiden ja muuntajassa tapahtuvien muutosten arviointiin on niiden suhteen ( $\text{CO}_2 / \text{CO}$ ) ja suhteen muutoksen arviointi. Vapaasti hengittävässä muuntajassa ilmasaturoituneen öljyn hiilidioksidin ja hiilimonoksidin suhde ( $\text{CO}_2 / \text{CO}$ ) on arviolta suurempi kuin 30. [58] IEC:n standardin 60599 mukaan 3,0 pienempää  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  suhdetta voidaan pitää merkinä paperieristeen hajoamisesta vian takia [47]. Tyypillinen normaaliarvo  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  suhteelle on yli 7,0 [5]. Lisäksi huomattavasti suurempi konsentraatio hiilimonoksidia verrattuna hiilidioksidin konsentraatioon viittaa korkean lämpötilan termiseen rasitukseen ja pienempi konsentraatio hiilimonoksidia suhteessa hiilidioksidiin viittaa matalamman lämpötilan termiseen rasitukseen. [58] Tämä siis olettaen, että hiilimonoksidin ja hiilidioksidin suhteet ja tyypilliset arvot ovat ylittäneet termisen vian toteamiseen vaaditut rajat. Luotettavan  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  suhdeanalyysin tekoon vaaditaan kuitenkin riittävät minimipitoisuudet kaasuja, jotka ovat yli 5000 ppm hiilidioksidille ja yli 500 ppm hiilimonoksidille [5].

Öljyyn muodostuneet kaasut ovat aina lähtöisin sähköisistä ja termisistä vioista aiheutuvien sähköisten purkausten ja korkean lämpötilan aiheuttamien eristeiden hiilivetyketjujen sidoksien katkeamisesta. Sidosten katkaisemiseen vaadittava energia riippuu kyseisestä sidoksesta. Hiiliatomien välisten sidosten katkaisemiseen vaaditaan enemmän energiaa kuin vedyn irroittamiseen hiiliatomeista. Vedyn ja hiiliatomin välisen sidoksen katkaisemiseen vaadittava energiamäärä on 338 kJ/mol, kun taas hiiliatomien välisen sidoksen hajoittamiseen vaadittava energia on 607 kJ/mol. Tästä syystä vaaditaan paljon enemmän energiaa tai korkeampia lämpötiloja hiiliatomien irroittamiseen toisistaan ja luomaan kaksois- tai kolmoissidoksia keskenään. Tämä johtaa siihen, että vetyä, metaania ja etaania syntyy jo matalammissa lämpötiloissa ja matalaenergisimmissä vikatilanteissa. Vetyä muodostuu jo osittaispurkausten (*partial discharge*) matalammasta vapautuneesta energiasta. Kun taas etyleeniä syntyy muita hiilivetyjä voimakkaammin 500 °C ylittävissä vikatilanteissa. Asetyleenin muodostuminen taas vaatii paljon korkeampia lämpötiloja ja sitä muodostuu pääasiassa valokaaripurkausten (*arcing*) sivutuotteena. Asetyleenia muodostuu myös alle 800 °C lämpötiloissa, mutta pääasiassa se vaatii 800 °C - 1200 °C lämpötilan tapahtuakseen. Tämä on mahdollista valokaaripurkauksen johtavassa ionikanavassa, jossa lämpötila voi olla useita tuhansia celsius-asteita. [47] Kuvaajassa 4 on esitetty erilaisten kaasukonsentraatioiden muodostumista vastaavia lämpötila-alueita ja niihin liittyviä vikaluokkia [63]. Kuvaajassa esitetyt vikaluokat ovat:

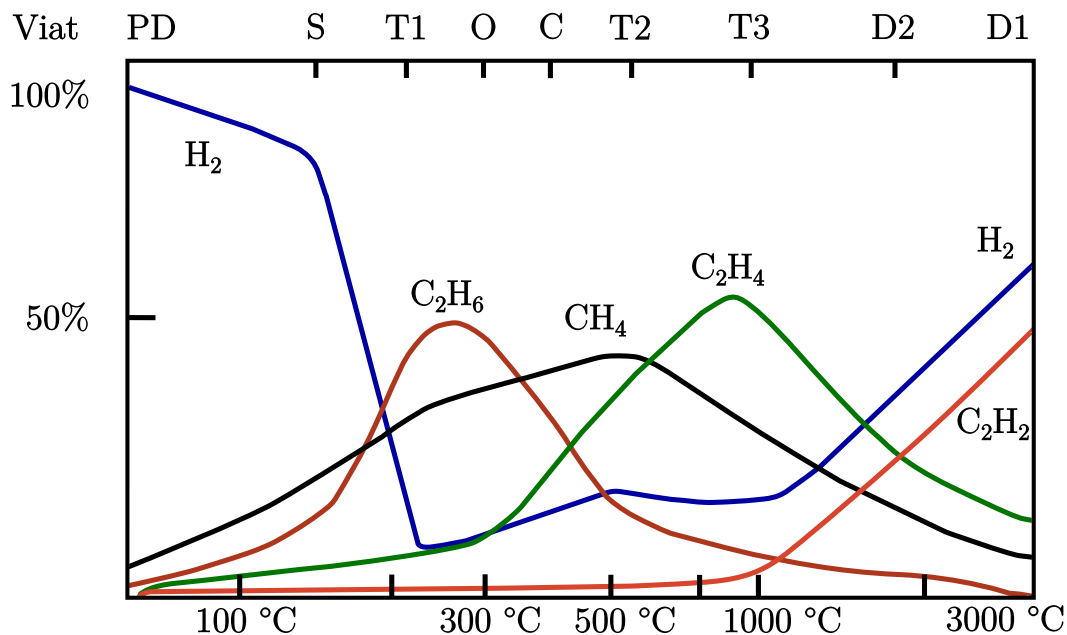
- **PD:** Osittaispurkauksia (*partial discharge*), jotka kipinöivät tai esiintyvät koronana (*corona*). Korona-tyypin osittaispurkaukset johtavat vahakerrostumaan paperieris-



teessä ja kipinöivät purkaukset aiheuttavat pieniä hiilteineitä lävistyksiä paperiin. Osittaispurkaukset voivat aiheutua: kaasutäytteisistä onteloista joissa eristettä ei ole, paperin korkeasta kosteuspitoisuudesta, öljyn supersaturoitumisesta tai kavitoimisesta. [47] Osittaispurkauksissa syntyy pääosin vetyä ja metaania sekä pienempiä pitoisuuksia etaania ja etyleeniä [5].

- **S:** Öljyn hajakaasuuntuminen (*stray gassing*) alle 200 °C lämpötilassa [63]. Hajakaasuuntuminen on kaasun muodostumista muuntajassa, joka ei johdu viasta tai ikääntymisestä, vaan pelkästään muista ainesosista öljyssä [64]. Hajakaasuuntuminen ei ole uusi ilmiö, mutta se on manifestoitunut voimakkaammin uusilla öljyillä [64], jotka on valmistettu vuoden 2000 jälkeen [65].
- **C:** Paperin hiiltymisen (*carbonization*) yli 300 °C lämpötilassa, jolloin menetetään paperin eriste-ominaisuuksia [63].
- **O:** Öljyn tai eristepaperin ylikuumentuminen alle 250 °C lämpötilassa, ilman paperin hiiltymistä [63]. Kyseinen vika aiheuttaa lähinnä paperin tummentumista ja on usein vaikea havaita myös visuaalisella tarkistuksella. [66]
- **T1:** Terminen vika (*thermal fault*) öljyssä ja/tai paperissa, joka tapahtuu alle 300 °C lämpötilassa. Johtaa todennäköisesti paperin tummentumiseen. Terminen vika voi aiheutua esimerkiksi muuntajan ylikuormituksesta tai estyneestä öljyn kierrosta käämityksissä. [47]
- **T2:** Terminen vika öljyssä ja/tai paperissa, joka tapahtuu yli 300 °C ja alle 700 °C lämpötilassa, joka lisäksi johtaa paperin hiiltymiseen. Tämänkaltaisen terminen vika voi johtua esimerkiksi viallisista kontakteista, liitoksista tai pyörrevirroista (*circulating currents*) muuntajassa. [47] Myös kuumat pisteet paperissa voivat olla kyseisen vian syitä [67].
- **T3:** Terminen vika, joka tapahtuu yli 700 °C lämpötilassa ja johtaa vahvaan öljyn hiiltymiseen. Öljyssä metallivärjäntyminen (*metal coloration*) viittaa vian tapahtuneen ainaki 800 °C lämpötilassa ja metallien yhdistyminen (*metal fusion*) merkitsee yli 1000 °C lämpötiloja. [47] Vakava terminen vika voi aiheutua esimerkiksi voimakkaista pyörrevirroista [47] tai huonoista kontakteista käämityksissä tai kuumasta pisteestä läpivientieristimessä (*bushing*) [67].
- **D1:** Matalaenergisiä purkauksia öljyssä ja/tai paperissa, jotka johtavat suuriin hiilteineisiin lävistyksiin paperissa, paperin pinnan hiiltymiseen tai hiilihiukkasten muodostumiseen öljyssä. [47] Purkausten energian ja intensiteetin kasvaessa asetyleenin ja etyleenin muodostuminen kasvaa [5]. Purkaukset voivat johtua esimerkiksi kipinöinnistä tai valokaarista huonojen liitoksien välillä [47].
- **D2:** Korkeaenergisiä purkauksia öljyssä ja/tai paperissa, jotka johtavat mittaviin vaurioihin, paperin hiiltymiseen, metallien yhdistymiseen purkauksen päissä ja öljyn hiiltymiseen [47]. Vikatyyppeihin kuuluvat valokaaret ja jatkuvat purkaukset, jotka synnyttävät lämpötiloja 700 °C ja 1800 °C väliltä, synnyttäen pääasiassa asetyleeniä

[5]. Viat voivat johtua myös esimerkiksi oikosuluista käämitysten tai pienjännite- ja maatason välillä [67].



Kuva 4: Kuvaaja vikatilanteiden ja lämpötilojen yhteydestä vetykaasun ja hiilivetykaasujen muodostumiseen [63, mukaillen].

Esitetyistä vikatyypeistä hajakaasuuntuminen (S), paperin ylikuumentuminen (O) ja paperin hiileentymisen (C), eivät kuulu IEC60599 standardin määrittelemiin vikatyyppeihin [47][63]. On huomioitava, että kuvassa 4 esitetty lämpötila-alueet ja vikakaasujen syntyminen konsentraatiot eivät ole absoluuttisia, vaan suuntaa antavia, ja että todelliset konsentraatiolukemat kentällä toimivassa muuntajassa ovat useiden tapahtumien summia. Kuvasta 4 voidaan hyvin erottaa kuinka vedyn muodostuminen on odotettua kaikissa vikatilanteissa. Metaania muodostuu myös useimmissa tilanteissa mutta todennäköisimmin pienempiä konsentraatioita. Kuvaajasta 4 nähdään myös, kuinka etaania muodostuu lähinnä matalamman lämpötilan termisissä vioissa ja paperieristeessä tapahtuvissa vioissa. Etyleenä ja asetyleeniä alkaa muodostua, kun lähestytään korkeampienergisiiä purkauksia ja korkeampien lämpötilojen termisiä vikoja. Lisäksi korkeamman energiatason purkauksissa vapautuu vetyä [5]. Vaikka asetyleeni liitetään yleensä korkeiden energioiden purkauksiin, muodostuu sitä myös matalan energiatason osittaispurkauksissa, mutta hyvin pieniä konsentraatioita verrattuna lisäksi muodostuvaan vetykaasuun [5]. Kuvasta 4 voidaan lisäksi erottaa kuinka eri vioilla syntyy erilaisia kaasujen suhteita, joiden avulla pystytään tarkemmin päättelemään muuntajan vikatilanne.

Öljyyn liukenee matalia konsentraatioita vikakaasuja osana sen normaalia toimintaa. IEC:n standardin mukaan kaikki kaasun muodostuminen muuntajan toiminnan aikana, joka ei nouse yli tyypillisten arvojen, voidaan pitää tyypillisenä tai normaalina kaasun muodostumisena [47]. Tästä syystä on määritelty tyypillisiä kaasupitoisuuksien ja muodostumisnopeuksien rajoja, joiden mukaan voidaan selvittää onko syytä olettaa muuntajassa olevan käynnissä vikatilanne vai onko kyseessä muuntajan tavanomaista kaasutusta

[47][52]. Kaasurajat ja kaasumittaukset on tyypillisesti ilmaistu ppm-arvoina (*parts-per-million*), mikä vastaa miljoonasosan suhdetta alkuperäiseen yksikköön. Öljystä mitatut kaasumäärät ovat tavanomaisesti ilmaistu ppm suhteena  $\mu\text{l/l}$ , mutta tämä ei aina välttämättä pidä paikkaansa. Kaasutilavuudessa mitatut suhteet ppm yksiköissä ilmaistaan usein  $\mu\text{g/l}$ . Tyypilliset kaasuarvot ovat riippuvaisia muuntajan mallista, iästä, kuormituksesta ja mahdollisesti myös käytetystä öljystä [47][67] sekä vallitsevasta ilmastosta [68]. Tästä syystä muuntajavalmistajat antavat omia suosituksiaan tyypillisistä arvoista [67]. Tyypillisten arvojen valinta ja arviointi on kuitenkin jätetty käyttäjän vastuulle, jonka suositellaan laskevan tyypilliset arvot oman verkkonsa muuntajien kaasuarvojen tietokannasta [47]. Yleensä suositellaan niin kutsuttujen 90 % tyypillisten arvojen käyttöä [47], jotka voidaan laskea sekä kaasun muodostumisnopeudelle että tyypillisille konsentraatioarvoille [68]. 90 % tyypilliset arvot lasketaan ottamalla muuntajapopulaation eri kaasuille mitatut tyypilliset konsentraatiot ja järjestämällä ne kaasuittain suuruusjärjestykseen, jolloin 90% muuntajien populaatiokokoa vastaavan järjestysnumeron omaava lukema vastaa 90 % tyypillisiä arvoja. Samaan tapaan lasketaan myös kaasujen muodostumisnopeuden 90 % tyypilliset arvot muuntajapopulaation tavanomaisista arvoista [68]. Taulukossa 4 on esitetty tyypillisiä liuenneiden kaasujen arvoja, joiden ylitys merkitsee mahdollisesti epänormaalia kaasutusta muuntajassa [5].

Taulukko 4: Liuenneiden kaasujen 90 % tyypilliset arvot [47][69].

|                          | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO      | CO <sub>2</sub> |
|--------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------------|
| Kaikki muuntajat         | 50-150         | 30-130          |                               | 60-280                        | 20-90                         | 400-600 | 3800-14000      |
| Ei käämikytkintä         |                |                 | 2-20                          |                               |                               |         |                 |
| Kommunikoiva käämikytkin |                |                 | 60-280                        |                               |                               |         |                 |

Taulukossa 4 esitettyjä 90 % tyypillisiä arvoja ei tule käyttää suoraan muuntajan arvioinnissa ellei ole mahdollisuutta käyttää valmistajan antamia arvoja tai dataa muuntajapopulaatiosta tyypillisten arvojen laskemiseen. Taulukon arvojen on tarkoitus antaa kuvaa toimintakuntoisen muuntajan tavanomaisista konsentraatiolukemista eri kaasuille ja ne ovat päteviä niin suljetuille muuntajille kuin myös vapaasti hengittäville malleille. Taulukosta 4 on huomioitava se, että muuntajan rakenteesta erityisesti käämikytkimen malli vaikuttaa asetyleenin (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) muodostumiseen. Kommunikoivalla käämikytkimellä tarkoitetaan käämikytkintä, joka on rakennettu siten, että sen on mahdollista vaihtaa tai välittää kaasuja ja/tai öljyä käämikytkimen eristetilavuuden ja muuntajan pääöljyttilavuuden välillä. Käämikytkimen tavanomainen toiminta aiheuttaa muuhun muuntajan toimintaan verrattuna suhteellisen korkeita asetyleenipitoisuuksia, jotka kommunikoivassa käämikytkimessä välittyvät tehokkaasti muuntajan eristeöljyyn. Tämä johtaa tavanomaista korkeampiin asetyleenipitoisuuksiin muuntajassa, joiden muodostuminen viittaisi muuten vakaviin korkeaan energisiin vikoihin ja purkauksiin, mutta ei käämikytkimen normaalitoimin-

nasta syntyvien kaasujen vuoksi ole erityisen vakavaa. Tästä syystä on tärkeää tiedostaa muuntajassa olevan käämikytkimen rakenne muuntajaan nähden liuenneiden kaasujen tarkkaa analyysiä varten. [47]

IEEE:n standardi öljyeristeisten muuntajien liuenneiden kaasujen analyysiin neuvoo eri tasoja liuenneiden kaasujen tarkkailuväleihin, perustuen muuntajan kaasujen konsentraatioiden ja konsentraatioiden muodostumisnopeuksiin [5]. Kaasujen tasot ja tarkkailuvälit on mahdollista laskea muuntajapopulaatioille erikseen [68], jotta ne vastaisivat paremmin oman muuntajan arvoja ja suosituksia. Esimerkkinä taulukossa 5 on esitetty Cigrén käytössä olevien muuntajien tarkkailutasot ja taulukossa 6 on esitetty kaasujen muodostumisnopeuksien tasot [52]. Tarkkailun taso 1 vastaa tyypillisiä arvoja eli tason 1 arvojen alittavat lukemat ovat tavanomaisia, joten suositeltu tarkkailuväli on vähintään vuosittain. Taso 2 ilmaisee lukemia, jotka ovat normaalia suurempia kaasutasoja, jolloin on tarpeellista selvittää muodostuvaa trendiä vikojen esiintymisen selvittämiseksi. Tason 3 lukemat viittaavat jo todennäköisesti vikaan ja voimakkaaseen eristeiden hajoamisreaktioon, joten tarkkailuvälin tulisi olla vähintään viikoittain. Taso 4 ilmaisee jo hyvin korkeata todennäköisyyttä sille, että muuntajassa on aktiivinen vikatilanne ja vaaditaan välitöntä toimintaa sekä kaasutasojen valvontaa päivittäin. [5] Tarkkailutasojen näytteenottoväli siis tihenee, kun vian todennäköisyys kasvaa.

Taulukko 5: Liuenneiden kaasujen tasot ( $\mu\text{l/l}$ ) tarkkailutasoittain [52].

|        | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> | TDCG | Näytteenottoväli |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|------|------------------|
| Taso 1 | 100            | 80              | 3                             | 170                           | 55                            | 500  | 8900            | 908  | Vuosittain       |
| Taso 2 | 180            | 129             | 13                            | 270                           | 126                           | 766  | 14885           | 1542 | Kuukausittain    |
| Taso 3 | 254            | 170             | 32                            | 352                           | 205                           | 983  | 20084           | 2101 | Viikoittain      |
| Taso 4 | 403            | 248             | 102                           | 505                           | 393                           | 1372 | 29980           | 3175 | Päivittäin       |

Taulukko 6: Liuenneiden kaasujen muodostumisnopeuksien ( $\mu\text{l/l/vuosi}$ ) tasot tarkkailuväleittäin [52].

|        | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> | TDCG | Näytteenottoväli |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|------|------------------|
| Taso 1 | 83             | 65              | 2                             | 89                            | 47                            | 660  | 5850            | 946  | Vuosittain       |
| Taso 2 | 179            | 175             | 7                             | 218                           | 176                           | 1737 | 15382           | 2539 | Kuukausittain    |
| Taso 3 | 280            | 313             | 17                            | 369                           | 382                           | 3054 | 27012           | 4513 | Viikoittain      |
| Taso 4 | 509            | 679             | 47                            | 745                           | 1074                          | 6491 | 57351           | 9738 | Päivittäin       |

Taulukoista 5 ja 6 havaitaan, että hiilidioksidin suurikin kasvu ei aiheuta merkittävää vian vaaran lisääntymistä, kun taas asetyleenin hyvinkin pieni kasvu kasvattaa vian todennäköisyyttä merkittävästi. Taulukoista nähdään myös, että hiilimonoksidin turvalliset lukemat

voivat olla suhteellisen korkeita muihin kaasuihin nähden. Metaanin muodostuminen puolestaan on verrattain vähäisempää, kuten myös kuvassa 4 on esitetty. Kaikki taulukoissa 5 ja 6 esitetyt rajat tarkkailuväleistä ja taulukossa 4 esityistä 90 % tyypillisistä arvoista eivät ole selkeitä merkkejä siitä, että muuntajassa on varmasti vika vaan ne tarkoittavat sitä, että muuntajan vikatodennäköisyys on kasvanut merkittävästi. Vian todennäköisyyden on todettu kasvavan erittäin voimakkaasti kaasutasojen ja kaasun muodostumisnopeuden ylittäessä niin kutsuttu vikaa edeltävä arvo (*pre-failure value*) tai vikaa edeltävä muodostumisnopeus (*pre-failure rate*) [68][69]. Cigrén muuntajissa lasketut ja tutkimuksen perusteella todetut vikaa edeltävät kaasuarvot ja muodostumisnopeudet eri kaasuille on esitetty taulukossa 7 [52].

Taulukko 7: Liuenneiden kaasujen vikaa edeltävät arvot ( $\mu\text{l/l}$ ) ja muodostumisnopeudet ( $\mu\text{l/l/24h}$ ) kaasuittain [52][68].

|         | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> | TDCG |
|---------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|------|
| ppm     | 725            | 400             | 450                           | 800                           | 900                           | 2100 | 50000           | 5380 |
| ppm/24h | 3              | 5               | 0,5                           | 5                             | 11                            | 46,5 | 411             | 71   |

Taulukosta 7 voidaan todeta, että vaaditaan jo varsin korkeita konsentraatioita ja kaasun muodostumisnopeuksia ennen kun katastrofinen vika on syntynyt. Taulukosta voidaan myös havaita, että metaanin ja asetyleenin vikaa edeltävät konsentraatiot ovat muita huomattavasti matalammat ja että asetyleenin vikaa edeltävä kaasun muodostumisnopeus on merkittävästi kaikkia muita kaasuja matalampi. Tästä syystä asetyleenin tarkkailussa mittaustarkkuus on erittäin tärkeää. Taulukosta 7 voidaan myös havaita, että hiilidioksidin ja hiilimonoksidin lukemat voivat nousta hyvinkin korkeiksi ennen vian tapahtumista.

Muuntajan eristeiden kohtaamat rasitukset voivat aiheuttaa nopeasti eteneviä muutoksia tai hitaasti ja vähittäin eteneviä muutoksia. [4] Tästä syystä matala kaasunmuodostumisnopeus ei yksinään takaa etteikö muuntajassa voisi olla vikaa ja on tarpeellista tarkkailla myös kaasujen konsentraatitasoja. Tavanomaisesti yli 10 % per kuukausi yli tyypillisten arvojen kasvava kaasujen muodostuminen on yleensä merkki aktiivisesta viasta, tietenkin olettaen, että oletettu mittaustarkkuus on parempi kuin  $\pm 10$  % [47]. Huomattavasti korkeampi eli yli 50 % per viikko kasvava kaasujen muodostuminen voi viitata jo korkeamman energitason purkauksiin ja lämpövikoihin [47]. Havaittaessa normaalia voimakkaampaa kaasujen muodostumista standardit usein suosittelevat tiheämpää tarkkailuväliä ja jatkuvan käytönaikaisen kunnonvalvonnan käyttöönottoa [47][5].

Varsinaiset muuntajien kaasuuntumiselle asetetut hälytysrajat ovat rajoja, jolloin muuntajan toiminnasta vastaavan on syytä tehdä nopeita ratkaisuja tai toimenpiteitä. Hälytysrajojen määrittely on jätetty muuntajan käyttäjien, valmistajien ja erillisten asiantuntijoiden vastuulle, eikä niitä suoraan standardeissa luetella. [47][5] IEC60599 standardi ehdottaa hälytysten tai varoitusten tapahtuessa harkitsemaan jatkuvaa käytönaikaisen kunnonvalvonnan monitorointilaitteen asennusta, kaasujen muodostumisen syvempää tarkastelua varten [47].

Öljynäytteestä tehdylle liuenneiden kaasun analyysille on tärkeää, että näyte on otettu muuntajavalmistajan suosittelemasta näytteenottoventtiilistä tai muusta paikasta, joka pystyy edustamaan muuntajan sisällä olevaa öljyä hyvin. Muutoin liuenneiden kaasujen analyysin tulokset eivät välttämättä vastaa todellista tilannetta muuntajan sisällä. [53] Näytteenottoon on olemassa eri standardeja ja keinoja [53][5].

Toinen tekijä, mikä voi vaikuttaa liuenneiden kaasujen analyysin tuloksiin ja konsentratioihin on hajakaasuuntuminen. Hajakaasuuntuminen (*stray gassing*) on kaasun muodostumista öljystä ja sen ainesosista itsestään kemiallisten prosessien kautta tavanomaisissa toimintalämpötiloissa. Kyseisellä tavalla syntyneet kaasut eivät ole oikean vikatilanteen sivutuotteita [70]. Tästä syystä hajakaasuuntumisesta syntyneet kaasut voivat vääristää analyysin tulosta ja johtaa erheellisesti vikadiagnoosiin. Hajakaasuuntumisesta syntyvät kaasut syntyvät tavallista matalammissa lämpötiloissa eli alle  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [71]. Hajakaasuuntumisesta syntyvien kaasujen määrä on voimakkaasti riippuvainen happipitoisuudesta ja lämpötilasta. Korkeammat lämpötilat ja happipitoisuudet vahvistavat kaasuuntumista. [70] Hajakaasuuntuminen on myös voimakkaasti riippuvainen käytetystä öljystä. Eri öljyillä voi olla toisiinsa verrattuina moninkertaisia kaasuuntumisalttiuksia, kuten esimerkiksi Voltesso 35 öljyllä on havaittu olevan moninkertaisia eroja vedyntuotannossa riippuen jo pelkästään valmistusvuodesta. [69] Hajakaasuuntumisen määrään vaikuttaa myös useimmiten se, onko öljyyn liuetettu inhibiittoreita. Hajakaasuuntuminen voimistuu lämpötilan ja happipitoisuuden kasvaessa. [70] Happea kuluu voimakkaasti hajakaasuuntumisessa [70][71] ja sen voimakas kulutus voi siis viitata hajakaasuuntumiseen. Öljynäytteiden saturoittaminen typellä hapen sijaan vähentää voimakkaasti metaanin ja hiilidioksidin syntymistä [72]. Hajakaasuuntumisesta tyypillisesti syntyviksi kaasuiksi on havaittu kuu-luvan vety, metaani, etaani ja hiilimonoksidi [64][73]. Lisäksi on havaittu hiilidioksidin [70] ja etyleenin hajakaasuuntumista [72][71]. Toisin sanoen kaikkia liunneiden kaasujen analyysissä käytettäviä kaasuja paitsi asetyleeniä on havaittu syntyvän tietyissä tilanteissa hajakaasuuntumisesta. Inhibitoidussa öljyssä havaittu hiilioksidien hajakaasuuntuminen on huomattavasti pienempää kuin ei inhibitoidussa öljyssä. Lisäksi hiilidioksidien hajakaasuuntumista voimistaa eri muuntajamateriaalit ja erityisesti kupari toimii voimakkaana katalyyttinä hajakaasuuntumisen kemiallisille reaktioille. [62] Korkeammassa lämpötilassa  $+(120\text{ }^{\circ}\text{C})$  myös sinkki öljyssä vahvistaa hiilidioksidin kaasuuntumista. [70] Vetyä voi syntyä teräksen, veden ja hapen keskinäisistä reaktioista. Vetyä voi myös vapautua hitaasti öljyyn uudesta ruostumattomasta teräksestä tai hitsausaumoista. [47] Lisäksi vetyä voi muodostua erityisten pinnoitteiden reaktioista veteen [47]. Joidenkin muuntajien rautaytimen rautalevyjen yhteen liimaamiseen käytetyn lakkapääällysteen on havaittu voimistavan vedyn hajakaasuuntumista. Vedyn hajakaasuuntumista voimistaa myös sinkin läsnäolo öljyssä, riippumatta siitä onko öljyssä inhibiittoreita. [70] Tietyissä tilanteissa ja öljyissä etyleenin on havaittu olevan voimakkaasti hajakaasuuntuva [72][71] vastoin aikaisempaa tutkimusta [69].

Hajakaasuuntumisen estämiseksi on ehdotettu: korkean luokan inhibitoitujen öljyjen käyttämistä, hapen määrän vähentämistä, jäähdityksen optimoimista ja öljyn uudelleenkä-sittely (*oil reclaiming*). Korkealuokkaisilla ja paremman hapettumisstabiilisuuden omaavil-la öljyillä on havaittu vähäisempää hajakaasuuntumista. [64] Hapen määrän vähentäminen öljyssä todennäköisesti vähentää hajakaasuuntumista [70]. Jäähdityksen optimointi ja toimintalämpötilan alentaminen vähentävät hapettumista ja pienentävät hajakaasuuntumi-

sen todennäköisyyttä [64]. Öljyn uudelleen käsittely (*oil reclaiming, oil refurbishment*) on öljyn uusiokäyttöä ja kunnonpalautusta varten tehtävä kemiallinen prosessi, joka puhdistaa öljyn ikääntymistuotteista ja parantaa sen ominaisuuksia [74]. Öljyn kunnonpalautuksen on havaittu vähentävän voimakkaasti käytössä olleen öljyn (*in-service oil*) hiilidioksidin, etyleenin [72] ja etaanin hajakaasuuntumista [73]. On kuitenkin hyvä muistaa, että kun öljyn puhdistusta tehdään, on todennäköisesti hankalaa saada paperiin impregnoitunut öljy kokonaan käsiteltyä, jolloin paperiin impregnoituneeseen öljyyn jääneet ikääntymistuotteet voivat vaeltaa laimentuneena takaisin uudelleen käsiteltyyn öljyyn. Paperiin imeytynyt öljy vastaa tilavuudeltaan noin 7 % muuntajan kokonaisöljytilavuudesta [69]. Muuntajille tehdään myös joskus niin kutsuttu kaasunpoisto (*degassing*), jossa öljystä pyritään poistamaan siihen liuenneita ilmakehän kaasuja ja toiminnan aikana muodustuneita kaasuja sekä öljyyn liuennutta vesihöyryä [11]. Muuntajan öljyn kaasunpoiston jälkeen paperiin impregnoituneeseen öljyyn jää vielä kuitenkin liuenneita kaasuja, jotka vapautuvat muuhun öljytilavuuteen hiljalleen. Tämä luonnollisesti aiheuttaa nousun liuenneiden kaasujen analyysin kaasukonsentraatioissa, vaikka mitään varsinaista vikaa tai muuta kaasuttavaa tekijää ei olisikaan. [69] Tästä syystä kaasunpoisto voi vaikeuttaa tulosten tulkintaa, varsinkin jos toimenpiteestä ei ole tehty selkeää merkintää muuntajan tietoihin.

### 2.3 Liuenneiden kaasujen vika-analysointimenetelmät

Kaasujen muodostumisesta kerätyn tietämyksen perusteella on muodostettu liuenneiden kaasujen analyysin (*dissolved gas analysis*) mittaustulosten tulkintaa varten erilaisia menetelmiä, joiden avulla pystytään kaasukonsentraatioiden suhteista tarkemmin päättämään muuntajan sisällä tapahtunut tai tapahtuva vikatilanne. Kaksi tiettyjen niin kutsuttujen avainkaasujen (*key gases*) suhteiseen perustuvaa hyvin tyypillistä analyysimetodia ovat Rogersin suhteiden (*Rogers ratio*) ja Doernenburgin suhteiden (*Doernenburg ratio*) analysointimetodit [5]. IEC:n standardi 60599 käyttää viantulkintaan Rogersin suhteiden metodia ja IEEE:n standardi C57.104-2008 sekä Rogersin suhteita että Doernenburgin suhteita [47][5]. Metodeissa käytettävät suhteet ovat seuraavanlaiset:

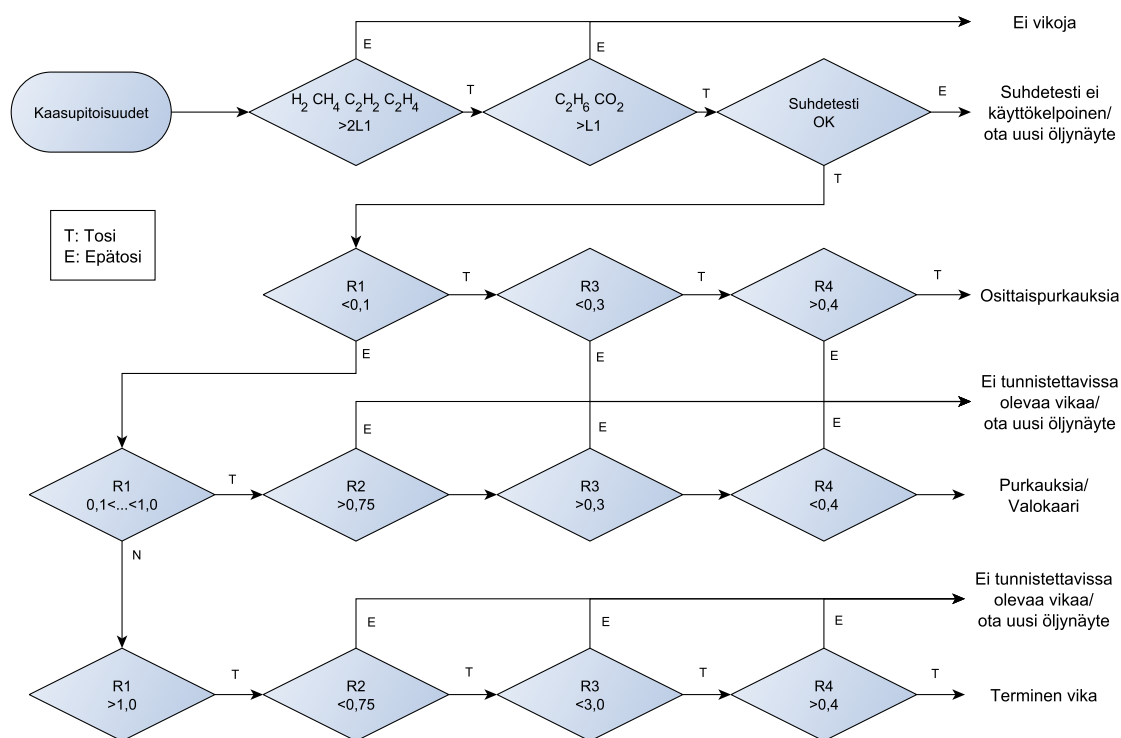
- $R1 = \text{CH}_4/\text{H}_2$ ,
- $R2 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,
- $R3 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ ,
- $R4 = \text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$ ,
- $R5 = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  [5].

Suhteiden lukuarvona saadaan yksikötön suhdearvo, joka lasketaan kaasupitoisuuksien ppm-lukemien perusteella. Doernenburgin metodi käyttää hyväksi suhteita R1, R2, R3 ja R4. Doernenburgin metodin käytön vianilmaisun alkuehtona vaaditaan, että vedyn, metaanin, asetyleenin tai etyleenin pitoisuus ylittää eri kaasuille taulukossa 8 esitetyn raja-arvon vähintään kaksinkertaisesti. Lisäksi Doernenburgin metodi edellyttää, että etaanin tai hiilimonoksidin arvo ylittää taulukossa 8 esitetyn raja-arvon. Rajaehtojen alittuessa Doernenburgin metodi ei havaitse minkäänlaista vikaa ja toteaa muuntajan

vikavapaaksi. Alkuehtojen täytyessä Doernenburgin suhteiden metodi vaatii vielä sen, että jokaisen käytettävän suhteen kaasuista vähintään toisen kaasun kaasupitoisuuslukema ylittää taulukossa 8 esitetyn lukeman. [5] Kaikkien ehtojen täytyttyä analyysi voidaan suorittaa kuvassa 5 esitetyn kaavion mukaisesti ja metodi antaa arvion vian vikatyypistä. Doernenburgin metodin käyttämät vikatyypien ehdot on esitetty myös taulukossa 9.

Taulukko 8: Doernenburgin metodin alkuehtojen kaasupitoisuuksien raja-arvot ilmaistu ppm-arvoina ( $\mu\text{l/l}$ ) [5].

| Avainkaasu              | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO  |
|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|
| ppm ( $\mu\text{l/l}$ ) | 100            | 120             | 1                             | 50                            | 65                            | 350 |



Kuva 5: Kaaviokuva Doernenburgin metodin käytöstä [5, mukaillen].

Doernenburgin metodi on mahdollista tehdä myös kaasutilavuuden tai kaasureleen kaasujen perusteella, jolloin kaasupitoisuuksien raja-arvot eroavat taulukossa 9 esitetyistä arvoista. Doernenburgin metodi ei pysty diagnosoimaan kuin osan standardien mukaisista vikatyypeistä. [5] Kuten kaaviokuvasta 5 voidaan nähdä, kaikkien käyttöä varten vaadittujen ehtojen täytyttyä on kuitenkin olemassa tilanteita, jolloin Doernenburgin metodi ei kuitenkaan pysty antamaan diagnoosia vikatyypistä. Tämä johtuu siitä, että on kaasupitoisuuksia, joilla lasketut suhteet eivät toteudu taulukon 9 mukaisesti, vaikka al-



Taulukko 9: Doernerburgin metodin vikatyypin raja-ehdot [5].

| Vikadiagnoosi   | R1                       | R2  | R3                                 | R4  |
|---|--------------------------|---|------------------------------------|---|
|   | $\text{CH}_4/\text{H}_2$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$ |
| Terminen vika   | >1,0                     | <0,75                                       | <0,3                               | >0,4  |
| Osittaispurkauksia<br>(matalaenergisiä)               | <0,1                     | <0,01                                       | <0,3                               | <0,4  |
| Valokaari (tai korkeaenergisiä<br>osittaispurkauksia) | $0,1 < \dots < 1,0$      | >0,75                                       | >0,3                               | <0,4  |

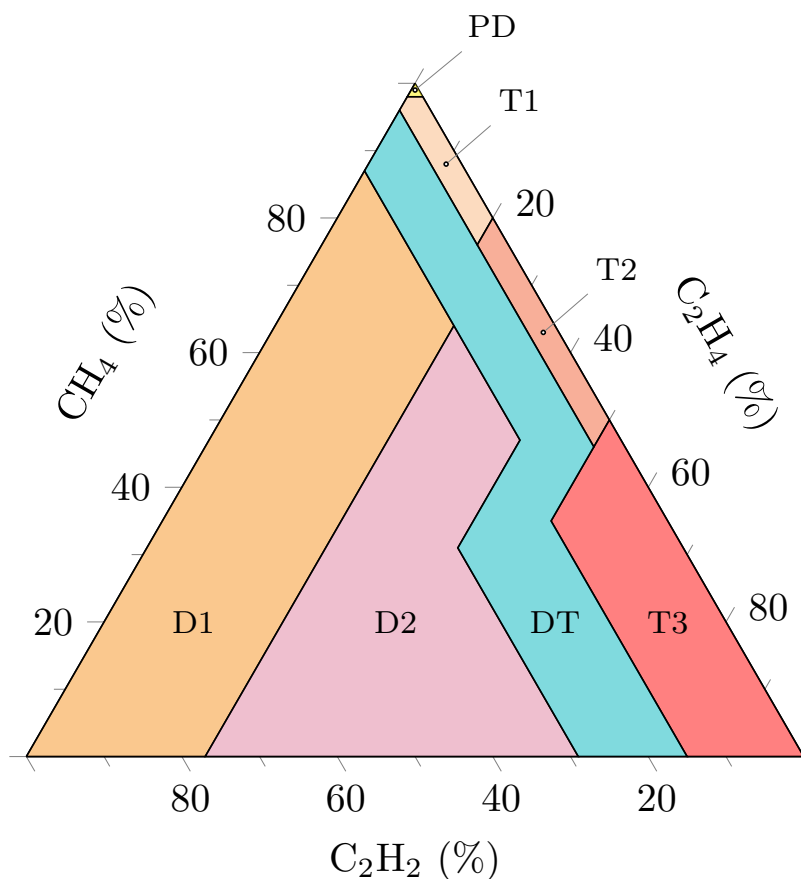
kuehdot toteutuvatkin. Diagnosoimatta jäävät viat ja rajattu vikatyypin tunnistus ovat Doernerburgin metodin heikkouksia.

Toinen tavanomaisimmista liunneiden kaasujen analyysin diagnosointimeteodeista eli Rogersin suhteiden metodi (*Rogers ratio*) käyttää suhteita R1, R2 ja R5 [5]. Esitetty metodi on IEEE:n versio alkuperäisestä Rogersin suhteiden metodista, jossa vertailtavia suhteita on neljä [75]. Rogersin suhteiden metodin diagnosoinnin raja-arvot eri vikatyypeille on esitetty taulukossa 10, jotka selkeästi eroavat taulukossa 9 esitetyistä Doernerburgin metodin raja-arvoista. Rogersin suhteiden metodi ei vaadi erityisten alkuehtojen täyttymistä, mutta toimii muuten samaan tapaan Doernerburgin metodin kanssa. Rogersin suhteiden metodi ei myöskään ole määritelty kaikissa mahdollisissa kaasupitoisuuksien suhteissa ja voi johtaa tilanteeseen, jossa kaasuanalyysistä saadut pitoisuuksien suhteet eivät sovi Rogersin metodin raja-arvoihin ja diagnoosia ei voida tehdä. Rogersin suhteiden metodissa on siis samankaltaisia ongelmia kuin Doernerburgin metodissa. [5] Rogersin metodi kuitenkin kykenee erottelamaan tulkittavissa olevat viat IEC:n 60599 standardin määrittelemiin perusvikatyyppeihin. IEC:n standardissa esitetty liunneiden kaasujen analyysin diagnosointimethodi pohjautuu myös alkuperäiseen Rogersin metodiin. IEEE:n 57.104-2008 standardin mukainen Rogersin suhteiden metodi käyttää hieman IEC:n standardista eroavia luokitteluita ja raja-arvoja. [47] [5] Rogersin suhteiden metodin rajaehtojen pitäisi päteä niin öljyyn liunneiden kaasujen ja muuntajan kaasutilavuuden perusteella tehtyihin kaasupitoisuuksien mittauksiin. [5]

Doernerburgin ja Rogersin suhteiden metodin lisäksi suosituimpia ja käytetyimpiä liunneiden kaasujen analyysin diagnosointimeteodeja on Duvalin kolmio -metodi [34]. Duvalin kolmio -metodissa kaasujen suhteiden prosenttiosuudet toisiinsa verrattuina muodostavat trilianääriseen koordinaatistoon pisteen, jota voidaan verrata Duvalin kolmioon muodostettuihin alueisiin vian tulkitsemiseksi. Duvalin kolmio -metodi on luotu IEC:n TC10 tietokantaan merkittyjen vikojen DGA tulosten perusteella. [76] Duvalin kolmio -metodia tulee käyttää vain, jos on syntynyt merkittäviä kaasupitoisuuksia [77]. Duvalin kolmio -metodiin kuuluu eri kolmioita, joissa käytetyt kaasusuhteet ja vika-alueet ovat erilaisia ja, jotka on tarkoitettu eri tilanteille sekä eri eristävälle nesteille [66]. Kuvassa 6 on esitetty Duvalin kolmio 1 vika-alueineen.

Taulukko 10: Rogersin suhteiden metodin vikatyypin raja-ehdot (IEEE:n standardin 57.104 mukaisesti) [5].

| Vikadiagnoosi  | R2<br>$C_2H_2/C_2H_4$ | R1<br>$CH_4/H_2$ | R5<br>$C_2H_4/C_2H_6$ |
|--|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Ei vikaa   | <0,1                  | 0,1<...<1,0      | <1,0                  |
| <b>D1/PD:</b> Matalaenergisiä purkauksia tai/ja osittaispurkauksia | <0,1                  | <0,1             | <1,0                  |
| <b>D2:</b> Korkeaenergisiä purkauksia                              | 0,1<...<3,0           | 0,1<...<1,0      | >3,0                  |
| <b>T1:</b> Terminen vika (<300 °C)                                 | <0,1                  | 0,1<...<1,0      | 1,0<...<3,0           |
| <b>T2:</b> Terminen vika (<700 °C)                                 | <0,1                  | >1,0             | 1,0<...<3,0           |
| <b>T3:</b> Terminen vika (>700 °C)                                 | <0,1                  | >1,0             | >3,0                  |



Kuva 6: Duvalin kolmio -metodin kolmio numero 1 [76, mukaillen].

Duvalin kolmion 1 käyttämät suhteet ja koordinaatiston pisteet voidaan laskea seuraavasti yhtälöiden 6, 7 ja 8 avulla:

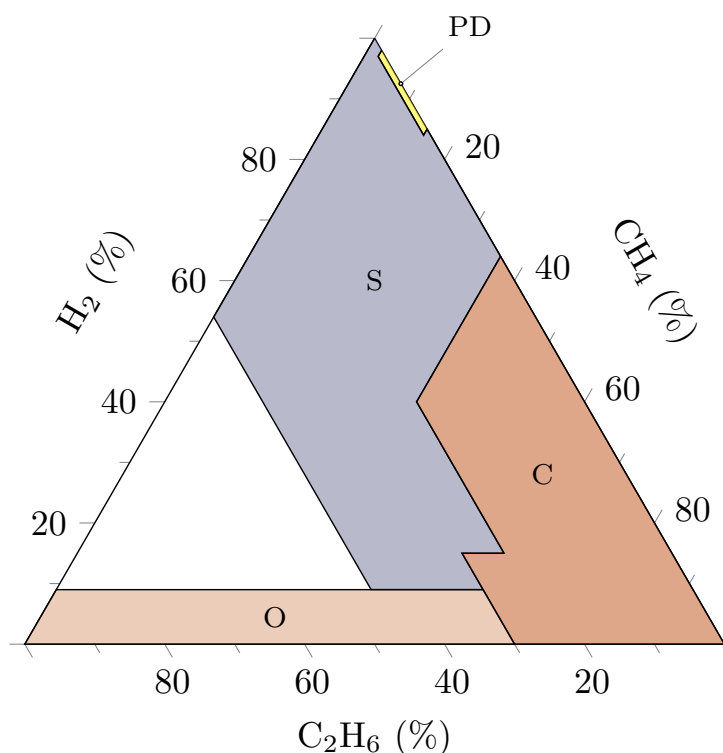
$$CH_4\% = \frac{100x}{x + y + z}, \quad (6)$$

$$C_2H_4\% = \frac{100y}{x + y + z}, \quad (7)$$

$$C_2H_2\% = \frac{100z}{x + y + z}, \quad (8)$$

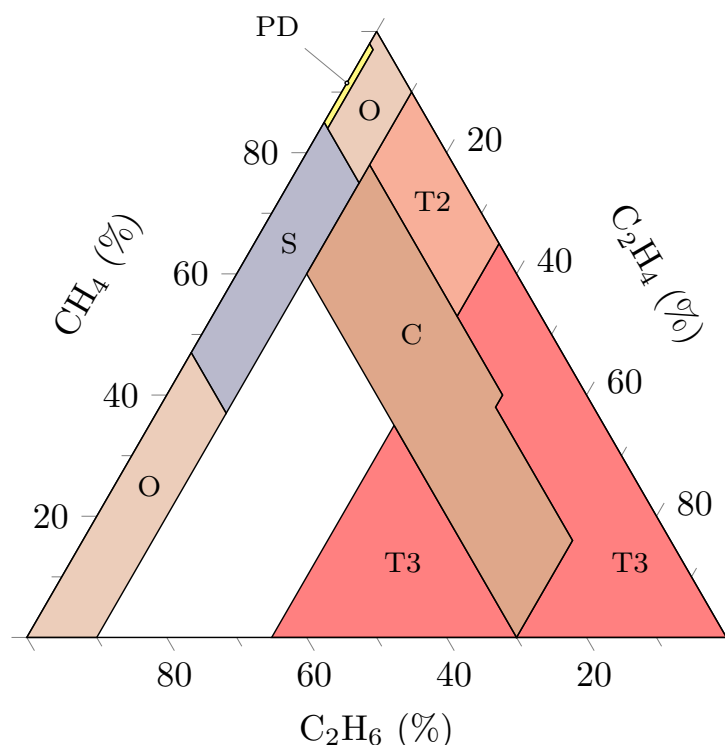
missä  $x$  on metaanin ( $CH_4$ ) pitoisuus ppm-arvoina ja  $y$  ja  $z$  ovat etyleenin ( $C_2H_4$ ) ja asetyleenin ( $C_2H_2$ ) pitoisuudet ppm-arvoina.

Kuvasta 6 nähdään kuinka kaasupitoisuuksien suhteiden avulla lasketuista koordinaateista saadaan aikaan selkeästi nähtävä diagnoosi. Kuvasta 6 nähdään myös Duvalin kolmio-metodin ilmaisemat IEC:n standardin mukaiset vikatilanteet, T1, T2, T3, D1, D2 ja PD. Lisäksi metodi ilmaisee myös termisten ja sähköisten vikojen sekoituksen yhtenä erillisenä vikatilanteena (DT). [76]



Kuva 7: Duvalin kolmio -metodin kolmio numero 4 (2012 uudistettu versio) [63][78, mukaillen].

Duvalin kolmiosta 1 on jatkojalostettu Duvalin kolmiot 4 ja 5, jotka käyvät myös mineraaliöljyille. Duvalin kolmiot 4 ja 5 on tarkoitettu antamaan lisädiagnoosi viantunnistukseen Duvalin kolmiolla 1 tehdyn perustunnistuksen jälkeen.[66] Duvalin kolmioita 4 ja 5 ei tule käyttää, jos Duvalin kolmiolla 1 on saatu diagnoosiksi matala- tai korkeaenergisiä purkauksia (D1, D2). Duvalin kolmiota 4 tulee käyttää vain, jos kolmiolla 1 on tunnistettu vikatilanne PD, T1 tai T2 eli alle 700 °C terminen vika tai osittaispurkauksia. Duvalin kolmiota 5 tulee käyttää vain kun on tunnistettu ensin Duvalin kolmiolla 1 vikatilanteeksi T2 tai T3 eli yli 300 °C asteen terminen vika. Kolmiot 4 ja 5 auttavat tunnistamaan tarkemmin johtuuko vika osittaispurkauksista (PD), paperin hiiltymisestä (C), paperin tai



Kuva 8: Duvalin kolmio -metodin kolmio numero 5 (2012 uudistettu versio) [63][78, mukaillen].

öljyn ylikuumenemisesta (O) vai johtuuko vikatulkinna hajakaasuuntumisesta (S). [63] [78] Duvalin kolmiot 4 ja 5 on esitetty kuvissa 7 ja 8. Duvalin kolmioiden 1, 4, ja 5 lisäksi on olemassa kolmio 2 käämikytkinten diagnosointiin [66], josta on olemassa alaversioita a-e eri käämikytkinmalleille [78]. Duval on myös kehittänyt Duvalin viisikulmion, joka käyttää viiden kaasun pitoisuuksien suhteita vikojen diagnoosiin. Duvalin viisikulmioita mineraaliöljyjen liuenneiden kaasujen tulkintaan on kaksi. Duvalin viisikulmio numero 1 pystyy ilmaisemaan 6 IEC:n standardin mukaista perusvikatyyppiä (PD, D1, D2, T1, T2 ja T3). [65] Duvalin viisikulmiolla 1 on tarkoitus, kuten kolmiolla numero 1, selvittää vian perustyyppi. Duvalin viisikulmiota käytetään samaan tapaan kuin kolmioita 4 ja 5 vian alatyypin tarkempaan tarkasteluun. [77] Duvalin kolmioita 1, 4 ja 5 on niiden vika-alkuehtojen pätiessä mahdollista käyttää yhdessä viisikulmioiden 1 ja 2 kanssa. Jos viisikulmioilla ja kolmioilla saadaan eroavia diagnooseja on mahdollista, että muuntajassa on sekoitus eri vikatyypien vikoja yhtäaikaaisesti. Tästä syystä viisikulmioiden ja kolmioiden yhteiskäytöllä on toisinaan mahdollista selvittää useiden yhtäaikaisten vikatilanteiden olemassaolo muuntajassa. [65] Yleisesti ottaen käytettävissä olevat diagnoosimenetelmät eivät kykene erottamaan vikojen sekoitusta, vaan diagnosoivat yksittäisen vian. Lisäksi on olemassa Duvalin kolmiot 3, 6 ja 7 sekä viisikulmio 3 muille eristenesteille kuin mineraaliöljyille, kuten synteettisille ja luonnollisille estereille [65] [77] [79].

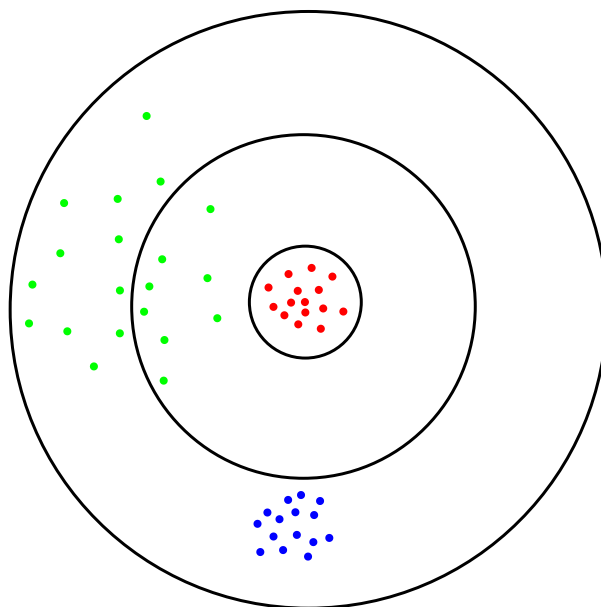
Duvalin kolmioiden ja viisikulmioiden sekä IEC:n ja IEEE:n standardien esittämien tulkintatapojen lisäksi on useita erilaisia tutkimuksissa ja artikkeleissa ehdotettuja parannusehdotuksia ja uusia tulkintatapoja [80][81][82][83][84][85]. Esimerkiksi uudentyyp-

pisiä viisikulmioita ja graafisia metodeja sekä neuroverkkojen käyttöä analyysin apuna on ehdotettu vikadiagnoosin parantamiseksi [86][87][88][89]. Duvalin kolmio -metodi on useassa tutkimuksessa todettu erittäin tarkaksi ja todennäköiseksi antamaan oikean vikadiagnoosin sekä myös hyvin havainnollistavaksi menetelmäksi [90], joka mahdollistaa vikojen kehittymisen tarkastelun. Duvalin kolmion on usein todettu olevan verrattain tarkempi kuin IEC:n ja IEEE:n standardien esittämät muut metodit [79][91]. Duvalin kolmion etuna on myös se, että se kykenee aina antamaan vika-analyysin, kun taas muissa metodeissa on useita tapauksia, jolloin diagnoosimenetelmä ei tuota yhtään diagnoosia [91][92]. Mutta tämä voi tietenkin johtaa vääriin vikadiagnooseihin, jos diagnoosimenetelmää yritetään käyttää ilman, että merkittävää kaasunmuodostumista on tapahtunut.

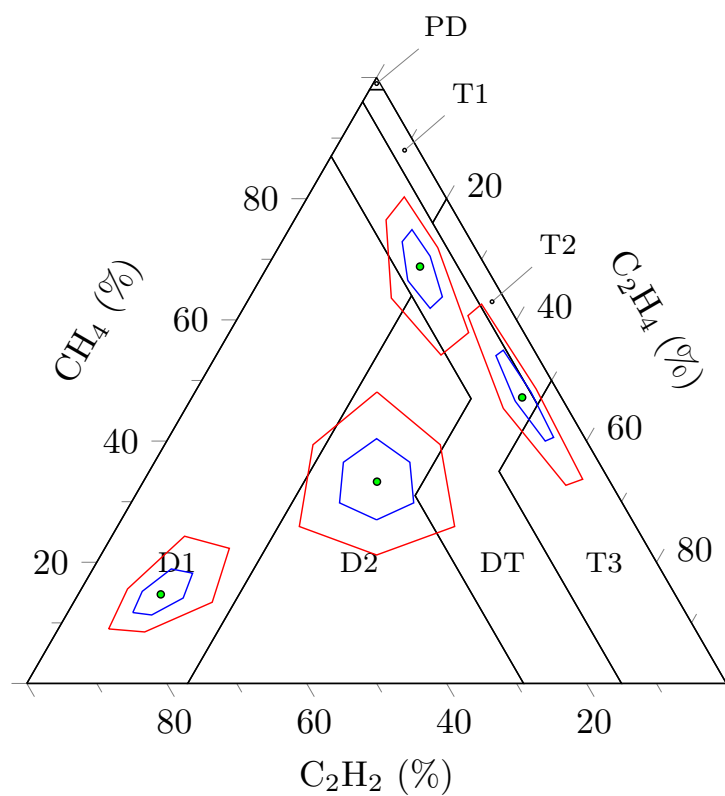
Diagnoosimenetelmillä pystytään usein päätyämään oikeisiin vikadiagnooseihin, mutta on muistettava, että kunnollisen vika-analyysin tekeminen vaatii useimmiten asiantuntijan tietämystä. Diagnoosimenetelmät jättävät aukkoja niiden tulkitsemisessa ja ne eivät ole aina 100-prosenttisesti paikkansapitäviä. Kuten aiemmin mainittua, esimerkkiongelmia ovat tilanteet, joissa diagnoosimenetelmät eivät pysty antamaan mitään selkeää diagnoosia ja kun muuntajassa on useita vikatilanteita yhtäaikaaisesti. Lisäksi tulkintaan vaikuttavat suoritettujen liuenneiden kaasun analyysin mittaustarkkuus ja mittauksen toistettavuus.

Esimerkiksi matalaenergisisä osittaispurkauksissa vetyä syntyy vain erittäin pieniä pitoisuuksia, sillä vapautuva energiamäärä on hyvin pieni. Tästä johtuen tämän tyyppisiä osittaispurkauksia voi olla hankala havaita ellei niiden lukumäärä ole erittäin suuri. Minkä vuoksi vika voi päästä kehittymään entistä vakavammaksi. [76] Myös asetyleenin tarkkailu voi olla hankalaa sillä jo hyvin pienet pitoisuudet ( $>2\text{ppm}$ ) ovat epätavallisia. Siksi on erittäin tärkeää, että suoritettujen liuenneiden kaasujen analyysin tarkkuus on erittäin korkea ja myös tulosten on oltava hyvin toistettavissa, eivätkä mittaustulokset saa olla alttiita satunnaisten tekijöiden aiheuttamille vaihteluille. Tarkkuuden ja toistettavuuden eroa on havainnollistettu kuvassa 9, jossa punaisten mittauspisteiden joukko kuvaa tarkkaa ja toistettavaa mittausta, sinisten mittauspisteiden joukko kuvaa toistettavaa, mutta epätarkkaa mittausta ja vihreiden mittapisteiden joukko epätarkkaa ja huonosti toistuvaa mittausta. Melkeinpä kaikentyyppisessä mittauksessa on useimmiten tärkeämpää, että mittausmenetelmällä saadut tulokset ovat hyvin toistettavissa kuin, että useamman mittaustuloksen absoluuttinen tarkkuus on hyvä. Absoluuttista tarkkuutta on kuitenkin yleensä aina mahdollista saada säädettyä ja kalibroitu mittausten toistettavuuden ollessa hyvä.

Epätarkat mittaustulokset vaikuttavat merkittävästi saatuihin liuenneiden kaasujen analyysituloksiin. Tarkkojen mittaustulosten merkittävyyttä voidaan havainnollistaa esimerkiksi Duvalin Kolmioon asetetuilla mittaustulosten virhetarkkuusalueilla, jotka on esitetty kuvassa 10. Kuvassa on esitetty pisteinä kuvitteellisten analyysitulosten perusteella lasketut diagnoosipisteet ja sinisellä  $\pm 15\%$  virhetarkkuusalue sekä punaisella  $\pm 30\%$  virhetarkkuusalue. Oikea absoluuttinen diagnoosipiste voi siis sijaita  $\pm 15\%$  mittaustarkkuudella missä tahansa sinisen alueen sisällä ja  $\pm 30\%$  mittaustarkkuudella missä tahansa punaisella alueella. Kuvasta 10 voidaan nähdä, kuinka itse diagnoosipisteiden sijainti vaikuttaa myös mittaustarkkuuden vaikutukseen vikadiagnoosissa, johtuen tertiäärin koordinaatiston ominaisuuksista. Kuvasta 10 voidaan myös havaita kuinka  $\pm 15\%$  mittaustarkkuus on useimmiten riittävä, eikä todennäköisesti aiheuta vikadiagnoosin vääristymistä. Voidaan myös havaita, että  $\pm 30\%$  mittaustarkkuudella on hyvin mahdollista saada erittäin erilaisia ja virheellisiä vikadiagnooseja.



Kuva 9: Tarkkuuden ja toistettavuuden ero [2, mukailen].



Kuva 10: Virherajat  $\pm 15\%$  ja  $\pm 30\%$  Duvalin kolmiossa.

### 3 Liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteet

Liuenneiden kaasujen analyysin tekoon eli pitoisuuksien tasojen mittaukseen öljystä on olemassa muutamia standardoituja menetelmiä, jotka ovat itsessään suunniteltu ennemminkin laboratoriokäyttöön kuin muuntajiin kytketyille analysaattorilaitteille. Analysaattorilaitteet imitoivat näitä metodeja ja pyrkivät toistamaan saman mitä tehdään laboratorioissa.

Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti laboratorioanalyysiin liittyviä liuenneiden kaasujen menetelmiä ja mittaustarkkuuksia. Tästä jatketaan selvittämällä analysaattorilaitteissa käytettäviä mittaustekniikoita ja menetelmiä. Lisäksi kappaleessa esitellään tutkimuksen kohteena oleva Vaisalan tuotekehityksen analysaattorilaitteen prototyyppi.

#### 3.1 Kaasunäytteen erotusmenetelmät

Laboratorioissa käytetyt menetit ovat hyvin standardoituja ja vakiintuneita, toisin kuin analysaattorilaitteiden toimintamenetelmät. IEC:n standardin 60567 mukaan kuvatut menetelmät liuenneiden kaasujen analyysin kaasunäytteen erotukseen ovat: monisyklinen tyhjiöerotus (*Multi-cycle vacuum extraction*), joka tunnetaan myös Toeplerin pumppu-menetelmänä; yksisyklinen tyhjiöerotus (*single-cycle vacuum extraction*), joka tunnetaan myös osittaisen kaasunpoiston -menetelmänä (*partial degassing*); kaasun irroitus -menetelmä (*stripping method*) ja headspace -menetelmä (*headspace method*). Headspace-menetelmässä öljynäytteen kaasut erottuvat öljystä tunnettuun kaasutilavuuteen tasapainotilanteessa liukoisuuskertoimien ja kaasun- ja öljytilavuuden suhteiden perusteella yhtälön 9 mukaisesti. [53] ASTM3612-standardissa on kuvailtu hyvin samankaltaiset tavat kaasujen erotukseen, joissa on pieniä eroja öljynäytteiden käsittelymetodeissa verrattuna IEC:n standardin versioihin [57]. Headspace-menetelmän öljyyn liuenneen kaasun konsentraatio lasketaan seuraavasti:

$$C_L^0 = C_G(K + \frac{V_G}{V_L}), \quad (9)$$

missä  $C_L^0$  on öljynäytteen alkuperäinen konsentraatio eli kaasun pitoisuus öljyssä,  $C_G$  on kaasun mitattu konsentraatio kaasutilavuudessa,  $K$  on kaasun liukoisuuskerroin,  $V_G$  on kaasutilavuuden tilavuus ja  $V_L$  on nesteen eli öljynäytteen tilavuus [57]. Tyhjiöerotus-menetelmissä kaasunäyte erotetaan tyhjiöstä tyhjiön avulla. Yksisyklisessä tyhjiöerotuksessa (osittainen kaasunpoisto) kaasuja erotetaan öljynäytteestä vain kerran, jolloin osa kaasuista jää liuenneena öljyyn. Multisyklisessä menetelmässä tyhjiöerotus toistetaan useamman kerran, jotta kaikki kaasut irtoavat öljystä. Tyhjiöerotus -menetelmien etuna on se, että ne eivät ole riippuvaisia liukoisuuskertoimista, sillä kaasut irroitetaan täysin öljystä. [53]

Yleisimpiä näistä näytteenerotusmenetelmistä ovat tyhjiöerotus ja kaasutilavuuden menetelmä. Kaikissa standardien kuvaamissa menetelmissä, riippumatta kaasunäytteen valmistustavasta, kaasunäytteen pitoisuudet mitataan kaasukromatografilla. Eri näytteenotomenetelmien tarkkuutta eri laboratorioiden suorittamina on testattu ja arvoitu Cigré:n ja IEC:n toimesta [93]. Suorituskykytestien tulokset on esitetty yhteenvetona taulukossa 11.

Suorituskykytestien perusteella laboratorioiden suorittamien analyysien tarkkuus on hyvin laboratoriokohtaista. Tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi laboratorioiden täsmällis-

Taulukko 11: Cigré:n ja IEC:n laboratorioiden liuenneiden kaasujen analyysien suorituskykytestien tulokset [93]

|                         | Cigré                    |                     | IEC                      |                     |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
|                         | Tavanomaiset pitoisuudet | Matalat pitoisuudet | Tavanomaiset pitoisuudet | Matalat pitoisuudet |
| Paras laboratorio       | $\pm 1\%$                | $\pm 7\%$           | $\pm 3\%$                | $\pm 22\%$          |
| Keskimääräinen tarkkuus | $\pm 7\%$                | $\pm 27\%$          | $\pm 15\%$               | $\pm 30\%$          |
| Huonoin laboratorio     | $\pm 15\%$               | $\pm 65\%$          | $\pm 65\%$               | $\pm 64\%$          |

ten toimintakäytäntöjen noudattaminen. Jos parempaa arviota laboratorion tarkkuudesta ei ole laboratorioiden keskimääräiseksi tarkkuudeksi voidaan arvioida hiilivedylle noin  $\pm 15\%$  tai 1 ppm, vedylle  $\pm 15\%$  tai 5 ppm ja hiilimonoksidille  $\pm 15\%$  tai 25 ppm (kumpi vain on suurempi). Cigrén mukaan laboratorioiden mittaustulosten keskimääräinen toistettavuus on noin  $\pm 10\%$  tavanomaisilla pitoisuuksilla ja parhailla laboratorioilla noin  $\pm 2\%$ . [93] Eri menetelmien välisiä tarkkuuseroja on arvioitu samaan tapaan testaamalla laboratorioiden kykyä analyysihin tiedetyillä näytekonsentraatioilla. Tulosten pohjalta voidaan myös sanoa, että suuremmalla määrällä laboratorioita on vaikeuksia pystyä tarkkoihin mittauksiin ja analyysihin ASTM-standardin headspace-menetelmällä verrattuna muihin menetelmiin ja IEC-standardin headspace-menetelmään. Tulosten perusteella sekä tyhjiöerotus ja headspace -menetelmillä pystytään kuitenkin tarkkoihin tuloksiin, mutta eri laboratorioiden suorittamien mittausten tarkkuuserot ovat merkittäviä. [77]

### 3.2 Analysaattorilaitteiden liuenneiden kaasujen mittaamenetelmät

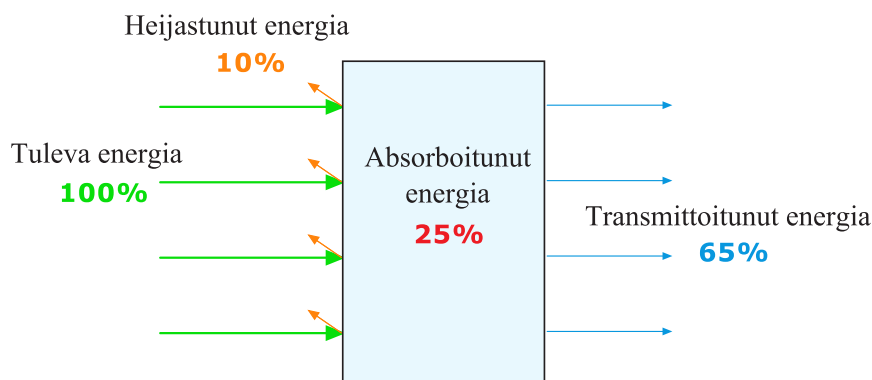
Laboratorioiden tekemät liuenneiden kaasujen analyysit suoritetaan tarkoilla ja kalliilla kaasukromatografeilla, käyttäen standardoituja menetelmiä. Analysaattorilaitteiden kaasu-mittaamenetelmät eroavat luonnollisesti hieman laboratorioissa käytetyistä metodeista, sillä teknisistä syistä ne tulevat kalliiksi tai niitä ei ole mahdollista toteuttaa. Markkinoilla on DGA-laitteita, jotka käyttävät mittaukseen kaasukromatografeja, mutta niiden käyttö DGA-analysaattorilaitteissa on kallista ja sen lisäksi niiden käyttötoiminnan ylläpito vaatii erilaisia huolto-kalibrointitoimenpiteitä [63]. Muita käytettyjä mittaamenetelmiä ovat infrapunamittaus, fotoakustinen mittaus, termiseen johtavuuteen perustuva anturi (TCD, *Thermal Conductivity Detector*) ja erilaiset polttokennoanturit (*Fuel Cell*) sekä solid-state-anturit [94][95][96].

Polttokennoantureissa havaittava kaasu erotetaan öljystä erityisen kalvon (*membrane*) avulla sensorille. Polttokennoanturin sähkökemiallinen sensori reagoi kaasun kanssa ja tuottaa sähköisen signaalin, jonka suuruuteen vaikuttaa kaasun konsentraatio. Polttokennoantureiden elinikä on useimmiten lyhyt, mikä ei ole hyvä asia teollisuusmittalaitteissa. [97][98] Solid-state-antureissa (*Solid-State sensors*) anturin rakenteen metalli-oksidit disosioivat kaasusta varattuja ioneja tai kompleksisia yhdisteitä, jotka aiheuttavat elektronien liikettä ja muuttavat anturin sähkönjohtavuutta. Solid-state-anturin biasoidut elektrodit mit-



taavat metalli-oksidin johtavuuden muutokset, jolla saadaan aikaan signaali, joka riippuu kaasukonsentraatiosta. Solid-state-anturit tavanomaisesti ovat erittäin pitkäikäisiä. [97]

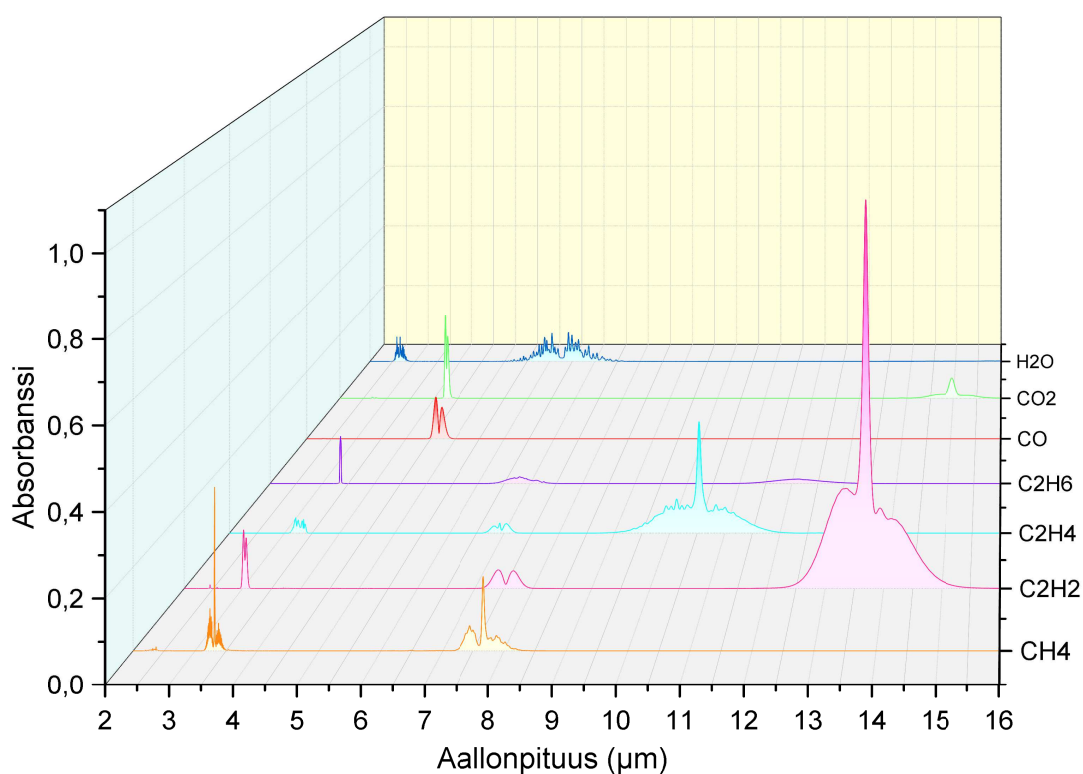
Kaasujen infrapunamittaus (IR, *Infrared*) perustuu kaasujen absorbointiin tietyillä aallonpituuksilla. Eri kaasut absorboivat infrapunasäteilyä tietyillä eri aallonpituuksilla, jolloin infrapunadetektorin vastaanottama säteilyteho pienenee kyseisillä aallonpituuksilla, kuten on havainnollistettu kuvassa 11. Absorboinnin lisäksi kaasut myös heijastavat infrapunasäteilyä, pienentäen infrapunan transmittanssia, kuten on nähtävissä kuvassa 11. Transmittanssin muutosten perusteella kyetään laskemaan havaittavan kaasun konsentraation muutokset ja taso kaasunäytteessä. [97] Kuvaajassa 12 on esitetty eri DGA-kaasujen ja vesihöyryn infrapuna-absorbanssia eri aallonpituuksilla.



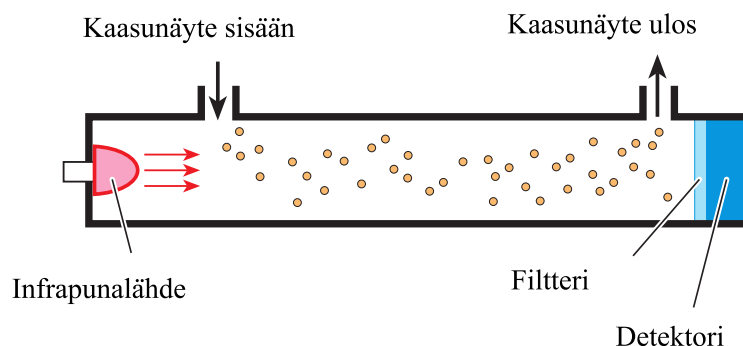
Kuva 11: Infrapuna-absorption toimintaperiaate [97, mukaillen].

Kuten kuvasta 12 voidaan nähdä, on olemassa tiettyjä aallonpituuksia, joilla kunkin kaasun ja vesihöyryn absorbanssi aiheuttaa muutoksen signaaliin. Vety, happi ja typpi eivät ole infrapunaa absorboivia kaasuja, joten niitä ei ole mahdollista mitata infrapunamittauksella. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki infrapunamittauslaitteesta. Infrapunalaitteessa infrapunälähteestä lähtevät valonsäteet läpäisevät kammion sisällä olevan kaasunäytteen ja kaasun läpi transmittoitunut säde suodattuu filterin läpi infrapunadetektorille [97]. Filttereitä käytetään tietyn aallonpituusalueen erottamiseksi infrapunälähteen lähettämästä säteestä, jolloin pystytään tarkkailemaan juuri tietyn kaasun konsentraatiota kaasunäytteessä.

Fotoakustinen mittaus toimii saman kaasujen absorptio-ilmion pohjalta kuin infrapunamittaus, mutta fotoakustisessa mittauksessa ei mitata suoraan transmittoituneiden infrapunasäteiden voimakkuutta infrapunadetektoreilla. Kaasumolekyylien absorboidessa infrapunasäteiden energiaa ne alkavat värähtelemään voimakkaammin saadun lisäenergian johdosta. Kaasumolekyylien värähtelyn voimistuminen aiheuttaa lämpötilan hienoisen nousun, joka suljetussa tilavuudessa johtaa pieneen paineen kasvuun. Kuten on yksinkertaistettuna esitetty kuvassa 14, tietylle aallonpituudelle rajattu pulssitettu infrapunasäde tulee vasemmalta ja läpäisee mittakammion läpinäkyvän kalvon. Kalvon läpäistessään infrapunasäteet diffraktoituvat fotoakustisen solun pienessä tilavuudessa olevaan kaasunäytteeseen. Pulssitetut infrapunasäteet ja kaasumolekyylien infrapunasäteiden absorptio aiheuttavat säteiden pulssituksen taajuudesta riippuvaa paineenvaihtelua pienessä kammiossa, joka on mahdollista havaita herkin mikrofonin avulla. Mikrofonin signaalin intensiteetin perusteella on mahdollista laskea kaasun konsentraatio. [97][99] Fotoakustisessa mittauksessa on



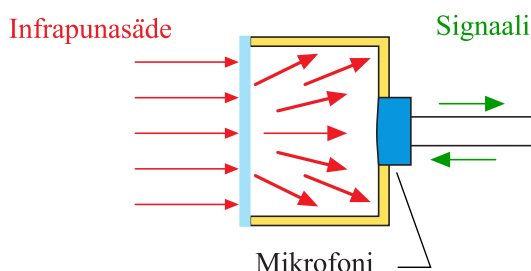
Kuva 12: DGA-kaasujen IR-absorbanssi.



Kuva 13: Yksinkertaistus kaasujen infrapunamittauksesta [97, mukaillen].

tärkeää valita infrapunavalonlähteen aallonpituuskaista hyvin tarkkaan, samaan tapaan kuin infrapunamittauksessa on tärkeää pystyä tarkkaan määrittelemään detektorin filterin päästökaista.

Solid-state-antureihin ja polttokennoantureihin perustuvat analysaattorilaitteet ovat useimmiten yksittäistä kaasua mittaavia laitteita tai ne mittaavat palavien kaasujen kokonaisuutta (TCG) [63]. Polttokennoantureiden huono puoli on niiden herkkyys useimmille hiilivetyyhdisteille. Täten ne eivät siis kykene erottamaan tarkalleen mitä kaasuja on havaittu ja kuinka paljon, vaan pelkästään niiden yhteissumman eli palavien kaasujen kokonaisuus-



Kuva 14: Yksinkertaistus kaasujen fotoakustisesta mittauksesta [97, mukailen].

man tai yhdistettyjen hiilivetyjen summan [98]. Suosituimpia yhden kaasun analysaattoreita ovat vetyanturit. Vetyantureiden heikkous kuitenkin on niiden ilmeinen herkkyyden vedyn hajakaasuuntumiselle [63]. Monikaasuanalysaattoreiden (*Multi-gas monitors*) kaasujen mittaus perustuu kaasukromatografiaan, infrapunamittaukseen tai fotoakustiseen mittaukseen. Infrapunamittaukseen ja fotoakustista mittaukseen käyttävät järjestelmät tosin joutuvat mittaamaan vedyn ja muut infrapuna absorboimattomat kaasut polttokenno- tai solid-state-antureilla. [63] Infrapunamittaukseen ja fotoakustiseen mittaukseen perustuvat menetelmät kuitenkin vaativat kaasujen erotuksen öljystä jonkinlaiseen kaasutilavuuteen, toisin kuin esimerkiksi solid-state-anturit, jotka kykenevät mittaamaan pitoisuuden suoraan öljystä. Tästä syystä kyseiset mittausmenetelmät vaativat enemmän toimintoja analysaattorilaitteita mutta kykenevät todennäköisesti parempiin mittaustarkkuuksiin. Infrapunamittaukseen ja fotoakustiseen perustuvien laitteiden suuri etu on se ettei kaasukromatografiassa vaadittua kantokaasujen vaihtoa tai kalibrointia vaadita [98], mikä vähentää muuntajan valvojan työtä. Fotoakustinen mittausmenetelmä on hyvin herkkä pienienkin pitoisuuksien havaitsemiseen ja sen on monissa kohteissa havaittu olevan infrapunamenetelmää herkempi rekisteröimään pienempiä pitoisuuksia [100]. Fotoakustinen mittausmenetelmä tosin on huomattavasti alttiimpi ympäristön aiheuttamille vaikutuksille, kuten ulkoisen kaasun paineen vaihteluille, tärinälle ja pienille ympäristölämpötilan muutoksille, jotka aiheuttavat ongelmia mittauksessa [101]. Esimerkkejä markkinoilla saatavilla olevista analysaattorilaitteista ja niiden käyttämisestä teknologioista on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12: Liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteita [94][95].

| Yritys            | GE                  | Serveron       | Kelman   | MTE           | Serveron |
|-------------------|---------------------|----------------|----------|---------------|----------|
| Tuote             | Hydran M2           | TM1            | Transfix | Hydrocal 1005 | TM8      |
| Mittausteknologia | FC                  | SS             | PA + SS  | IR + FC       | GC + TCD |
| Mitatut kaasut    | H <sub>2</sub> , CO | H <sub>2</sub> | 9*       | 4†            | 9*       |

\* H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>

† H<sub>2</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

FC *Fuel Cell*, Polttokennoanturi

SS *Solid-state*, Solid-state-anturi

IR *Infrared*, Infrapuna-anturi

PA *Photo-acoustic*, Fotoakustinen anturi

GC *Gas Chromatography*, Kaasukromatografia

TCD *Thermal Conductivity*, Lämmönjohtavuusanturi

Kuten taulukosta 12 nähdään, markkinoilla on käytössä hyvin monenlaisia anturitekniikoita käyttäviä laitteita, joiden kaasujen mittausominaisuudet vaihtelevat. Hyvin yleisiä markkinoilla ovat erilaiset vetyä tai yksittäistä kaasua mittaavat edullisemmat yhden kaasun analysaattorilaitteet (*single-gas monitors*). Markkinoilla on myös myynnissä useita monikaasuanalysaattoreita, joiden analysoimiin kaasuihin kuuluvat usein vety, hiilivetyyhdisteet ja hiilioksidit. Hapen ja typen mittaus ei ole markkinoilla äärimmäisen yleistä, mutta muutamat laitteet tarjoavat myös näiden ei-vikakaasujen analysoinnin. [94][95] Markkinoilla olevien eri analysaattorilaitteiden mittaustarkkuus on Cigrén 2015 suorittamien tutkimusten mukaan välillä 5 - 100 % [77]. Samankaltainen tutkimus Cigrén suorittamana vuonna 2008 näytti eri analysaattorilaitteiden tarkkuudeksi noin 9 - 34 %, lukuunottamatta joidenkin laitteiden vedyn mittauksen ongelmia [94] [77]. Analysaattorilaitteiden suorituskvyissä on siis paljon eroja, mutta parhaimmat testatuista analysaattorilaitteista ovat kykeneviä saavuttamaan Cigrén suosittamaan  $\pm 15$  % mittaustarkkuuden liuenneiden kaasujen analyysin pohjalta tehtävää diagnoosia varten.

### 3.3 Vaisala OPT100

Diplomityön tutkimuksen kohteena on vuoden 2016 loppupuolella julkaistava Vaisalan Optimus™ OPT100 liuenneiden kaasujen analysaattorilaitteen tuotekehityksen prototyyppi. Vaisala OPT100 on tarkoitettu tehomuuntajien jatkuvaan käytönaikaiseen kunnonvalvontaan. Laitteen tuotokuva on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15: Vaisala OPT100 - liuenneiden kaasujen analysaattorilaitte.

Analysaattorilaitte pystyy havaitsemaan kaikki vikadiagnoosimenetelmien käyttämät vika-kaasut (vety  $H_2$ , metaani  $CH_4$ , asetyleeni  $C_2H_2$ , etyleeni  $C_2H_4$ , etaani  $C_2H_6$ , hiilimonoksidi  $CO$ , hiilidioksidi  $CO_2$ ). Vaisala OPT100 käyttää hyväkseen tyhjiöerotus -menetelmää

kaasunäytteen erottamiseksi öljystä. Se ei ole täten riippuvainen liukoisuuskertoimista toisin kuin headspace -menetelmää hyödyntävät analysaattorilaitteet. OPT100 analysaattorin kaasujen analysointi pohjautuu infrapunamittaukseen eli öljystä erotetuista kaasuista mitataan kaasujen absorbointia, jolla pystytään laskemaan kaasujen pitoisuudet öljyssä. OPT100:n infrapunamittauksessa eri kaasujen infrapunasignaaleja mitataan suoraan infrapunadektoreilla. Öljyyn liuenneen vetykaasun pitoisuuden mittausta ei ole mahdollista infrapunamittauksella, sillä vetykaasu ei absorboi infrapunasäteitä. Vedyn mittausta OPT100 DGA-laitteessa perustuu Vaisalan MHT410 laitteessakin käytettävään kalvottoomaan katalyyttianturiin, jolla öljyyn liuenneen vetykaasun mittausta on mahdollista suoraan öljystä.

Taulukko 13: OPT100-prototyypilaitteelle määritellyjä alustavia mittaustarkkuusrajoitteita.

| Kaasu                         | Mittausalue | Mittaustarkkuus*  | Toistettavuus*     |
|-------------------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| H <sub>2</sub>                | 0-5000 ppm  | ±25 ppm tai ±25 % | ±15 ppm tai ±10 %  |
| CH <sub>4</sub>               | 0-10000 ppm | ±10 ppm tai ±10 % | ±10 ppm tai ±5 %   |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0-5000 ppm  | ±10 ppm tai ±10 % | ±1 ppm tai ±10 %   |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0-10000 ppm | ±10 ppm tai ±10 % | ±10 ppm tai ±5 %   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0-10000 ppm | ±10 ppm tai ±10 % | ±10 ppm tai ±5 %** |
| CO                            | 0-10000 ppm | ±10 ppm tai ±10 % | ±10 ppm tai ±5 %   |
| CO <sub>2</sub>               | 0-10000 ppm | ±10 ppm tai ±10 % | ±10 ppm tai ±5 %   |

\* Mittaustarkkuus määritellään suuremman virheen aiheuttavan virherajan mukaan

\*\* Etäänin toistettavuus on määritetty 5 mittauspisteen keskiarvon mukaan

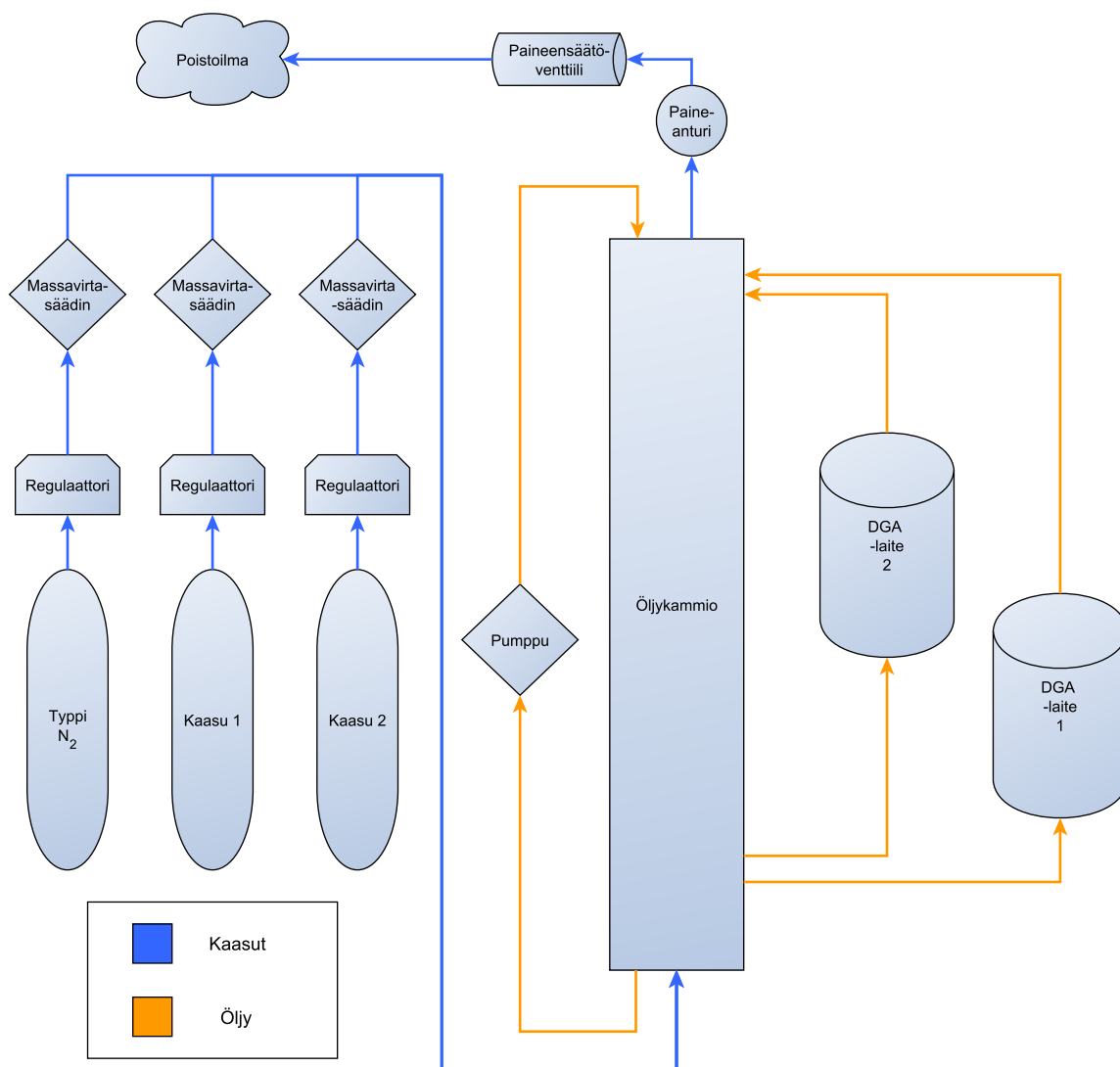
Prototyypille määritellyjä alustavia mittaustarkkuuden rajoja on esitetty taulukossa 13. Taulukosta 13 voidaan nähdä, että vedyn mittaustarkkuus on alustavasti arvioitu olevan hieman huonompi kuin muiden mitattavien kaasujen. Muuten alustavat arviot prototyypin tarkkuusrajoista ovat suhteellisen tasalaatuisia.

## 4 Mittausjärjestelyt ja -menetelmät

Diplomityössä tehty mittausjärjestelyt, -menetelmät ja mittaukset sekä muu kokeellinen osuus on pääosin käsitelty tässä kappaleessa. Lisäksi kappaleessa esitellään tehtyjen ratkaisujen perusteluja ja koko tutkimistyön ydinosuuteen liittyvän laitteiston toimintaa sekä sen periaatteita. Kappaleessa myös tarkastalleen ja esitetään saadut tulokset sekä laitteistolle tehtyä virheanalyysiä. Virheanalyysin tarkempi tarkastelu löytyy liitteistä A - C.

## 4.1 Mittausjärjestelmä ja näytteenvalmistus

Liuenneiden kaasujen mittausta varten diplomityössä on suunniteltu ja rakennuttu öljynäytteiden valmistukseen tarkoitettu laite, joka nimettiin KES-näytteenvalmistuslaitteeksi. Näytteenvalmistuslaitteen tarkoituksena on mahdollistaa eri kaasujen liuos muuntajaöljyyn, jotta voidaan luoda analysaattorilaitteille mitattava näyte laboratoriotestejä varten. Kuvassa 16 on esitetty näytteenvalmistusjärjestelmän toiminnalliset osat.



Kuva 16: Kaaviokuva näytteenvalmistusjärjestelmän rakenteesta.

Kuvassa 16 näkyvät putkistot, joissa kulkevat kaasut, on värjätty sinisellä ja putkistot, joissa on öljyä, on värjätty oranssilla. Kaasut tulevat järjestelmään kaasupulloista tai typen tapauksessa laboratorion typpiastianasta. Kaasuja syötetään vakioaineella käyttämällä regulaattoreita. Kaasujen suhteita säädetään massavirtasäätimillä ja pohjakaasuna käytetään typpeä (N<sub>2</sub>). Massavirtasäätimillä pystytään luomaan kaasuseos, jossa on haluttua kaasua tai kaasuja tietyt konsentraatiot ja loput typpeä. Kaasujen liuos öljyyn tapahtuu syöttä-

mällä luotu kaasuseos pitkän tiiviin putken sisällä olevan muuntajaöljyn läpi, jolloin öljy saturoituu kaasutilavuuden kaasukonsentraation perusteella mahdolliseen konsentraatioon. Järjestelmän sisälle muodostuvan yksittäisen kaasun öljynäytteen konsentraation  $C_L$  laskemiseksi on muodostettu Henryn lakiin ja Ostwaldin yhtälöihin perustuva yhtälö, joka voidaan ilmaista seuraavasti:

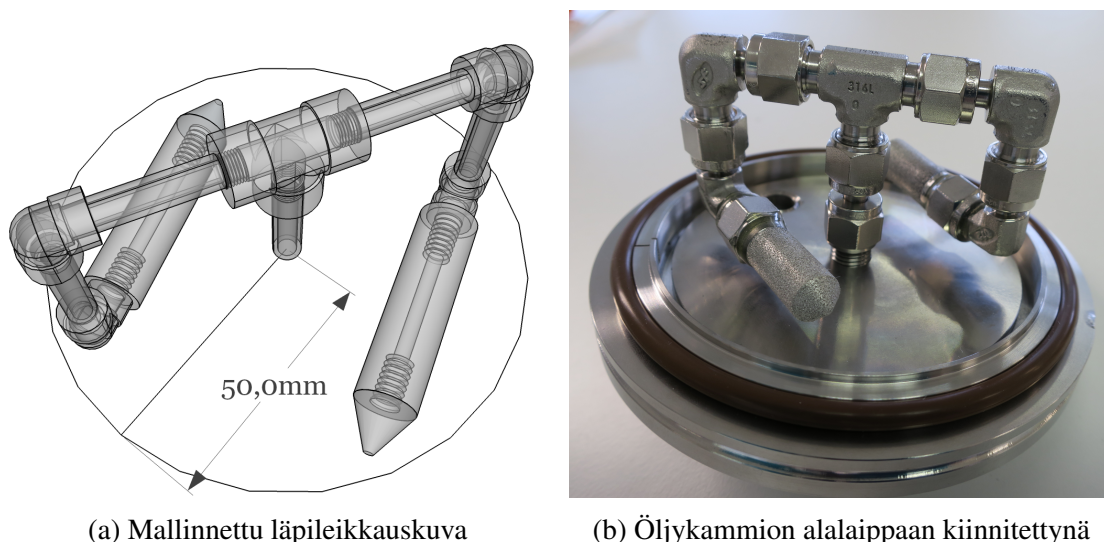
$$C_L = C_G \cdot L \cdot C_B \cdot \frac{P_C}{P_A} = \frac{F_G}{F_T} \cdot L \cdot C_B \cdot \frac{P_C}{P_A}, \quad (10)$$

missä  $C_G$  on syötetyn kaasun konsentraatio kaasuseoksessa,  $L$  on Ostwaldin kerroin,  $C_B$  on kaasupullon konsentraatio,  $F_G$  on liuotettavan ja syötetyn kaasun virtausnopeus,  $F_T$  on kaikkien syötettyjen kaasujen kokonaisvirtaus,  $P_C$  on öljysäiliön paine ja  $P_A$  on ilmanpaine laboratoriotilassa. Yhtälö 10 on tarkoitettu yksittäisen öljyyn liunneen kaasun konsentraation laskemiseksi. Yhtälön 10 avulla voidaan laskea vaadittava kaasutilan kaasusuhde tietyn öljyyn liunneen kaasupitoisuuden aikaansaamiseksi. Useampien eri kaasujen pitoisuuksien yhtäaikaissa näytteistyksissä on tarpeen ottaa huomioon kaikkien eri kaasujen konsentraatiot ja virtausnopeudet kokonaisvirtauksessa. Yhtälöstä 10 nähdään myös kuinka paineen kasvu öljykammion sisällä kasvattaa öljyyn liukenevaa pitoisuutta. Kyseinen yksinkertaistus pohjautuu siihen, että virtautettujen kaasujen osapaineet kasvavat kokonaispaineen ja normaalipaineen suhteen mukaisesti. Tämä johtaa suurempiin kaasutilavuuden ja öljytilavuuden kaasujen osapaine-eroihin, mikä kasvattaa samassa suhteessa öljyyn liukenevaa kaasupitoisuutta. Käytännössä öljynäytteen valmistuksen toimintaperiaatteena on siis kaasun pulputukseen perustuva näytteenvalmistus (*bubbling based sample preparation*), joka mahdollistaa myös öljynäytteen puhdistuksen liuenneista kaasuista.

Pulputusmenetelmässä tiettyä kaasukonsentraatiota syötetään öljynäytteen läpi, jolloin nousevien kaasukuplien ja öljyn välillä tapahtuu kaasujen vaihtoa, jossa suuremman konsentraation alueelta jakautuu molekyylejä pienemmän konsentraation alueelle. Jatkuva kaasunsyöttö ja kaasujen vaihto johtaa lopulta tasapainotilanteeseen, jossa öljyyn on liennut syötettävän kaasun konsentraatiota vastaava konsentraatio kaasua. Esimerkkinä, jos öljysäiliöön virtautetaan typpeä ja metaania ilman paineensäätöventtiilillä mahdollistettua ylipainetta, säätäen virtaussuhteet siten, että kaasuvirtauksessa metaanin pitoisuus on hallittu ja se on esimerkiksi 100 ppm. Tämä tarkoittaa sitä, että öljyyn liukenee metaania kunnes öljyyn liunneen metaanin määrä saturoituu liukoisuuskertoimen mukaiseen pitoisuuteen. Metaanin liukoisuuskertoimen  $20\text{ °C}$  lämpötilassa on noin 0,423, kuten taulukosta 2 voidaan nähdä. Näin ollen 100 ppm pitoisuudella kaasusta liukenee öljyyn 42,3 % eli noin 42,3 ppm yhtälön 10 mukaisesti. Pumpun virtauksella sekoitetaan öljyä rauhallisesti ja edistetään tasapainotilan saavuttamista koko öljyvtilavuudessa. Öljyyn liukenee myös typpeä sen saturaatiopisteeseen asti, mutta öljyyn liennut typen määrä ei vaikuta muuntajien liuenneiden kaasujen analyysissä merkittävästi, sillä typpikaasu on inertti kaasu ja ei täten reagoi tai vaikuta muihin kaasuihin tavanomaisissa paineissa. Samalla metodilla kuin öljykammioon luodaan näytteitä voidaan myös puhdistaa öljyä siitä. Eli syöttämällä öljysäiliöön puhdasta typpeä ja sekoittamalla öljyä voimakkaammin, saadaan öljystä irroitettua siihen liuenneita kaasuja ja virtautettua ne pois öljysäiliöstä ja sen kaasutilavuudesta, jolloin öljy puhdistuu kaasuista.

Öljykammiona käytetään pitkää putkea, joka on suljettu molemmista päistä tiivisteillä laipoilla. Öljykammio on hyvin korkea ja suhteellisen kapea, jotta kaasut saadaan

kulkemaan koko käytetyn öljytilavuuden lävitse tehokkaasti. Öljykammioon on mahdollista mahduttaa jopa 10 litraa muuntajaöljyä, jolloin säiliössä on edelleenkin noin 1,78 litran kaasutilavuus. Öljykammioon syötettävien kaasujen tulee muodostua öljyyn hyvin pieninä kuplina, sillä kuplien koko vaikuttaa kaasujen liukenemisnopeuteen [102]. Tästä syystä erilaisia materiaaleja on testattu käytettäväksi diffuusorina järjestelmässä. Testausten perusteella järjestelmään suunniteltiin sille erityisesti mitoitettu diffuusori-järjestelmä, jonka kautta kaasut työntyvät öljyyn pieninä kuplina. Diffuusorijärjestelmän mallinnuskuva on nähtävissä kuvassa 17a ja kuvassa 17b on esitetty se valmiina käyttökohteessa. Diffuusorijärjestelmässä kaasu vapautuu kahden putkijärjestelmän päissä olevien sinttereiden kautta, jotka on aseteltu siten, että kaasu levittyisi mahdollisimman tasaisesti koko öljykammion sisäpinta-alalle. Käytetyt sintterit ovat ruostumattomasta teräksestä valmistettuja ja niiden raekoko on  $38\ \mu\text{m}$ . Sinttereiden huokoinen rakenne varmistaa, että syötetty kaasu vapautuu öljyyn erittäin pieninä kuplina, mikä edistää kaasujen liukenemistä öljyyn.



(a) Mallinnettu läpileikkauskuva

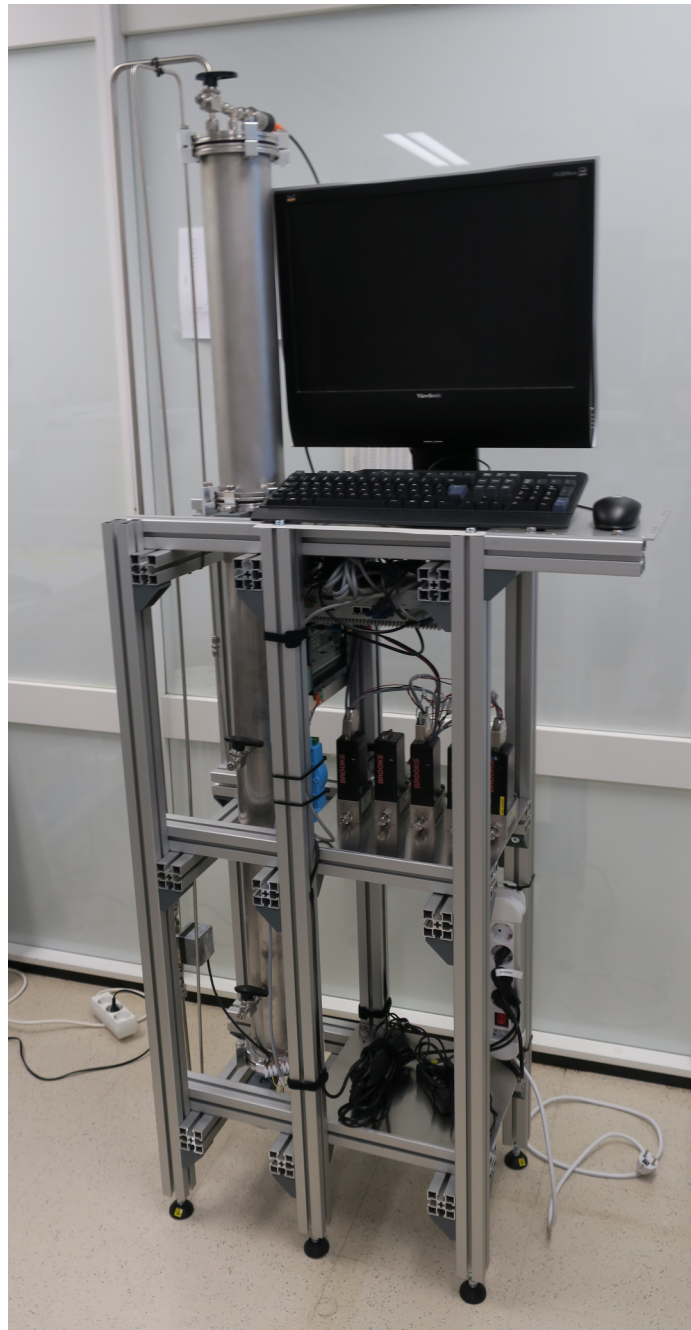
(b) Öljykammion alalaippaan kiinnitettynä

Kuva 17: Diffuusorijärjestelmä.

Öljykammiossa olevan öljyn läpi kulkeneet kaasut kerääntyvät kammion yläosan kaasutilavuuteen ja työntyvät ulos paineensäätöventtiilin kautta poistoilmaputkeen. Paineensäätöventtiilin avulla mahdollistetaan korkeamman paineen luonti öljykammioon, mitä jotkut DGA-analysointilaitteet saattavat vaatia ja jolla voidaan simuloida muuntajan sisällä mahdollisesti olevaa painetta. Sen käyttö ei ole täysin välttämätöntä ja kaasujen poisto -vaiheessa sen käyttö on jopa haitallista kaasujen irrottamiseksi, sillä korkeampi paine pyrkii pitämään kaasut liuenneena öljyssä. Paineensäätöventtiili mahdollistaa sen, että näytteenvalmistuslaitteella on mahdollista testata myös muita analysointilaitteita tutkimuksen kohteena olevan OPT100 laitteen lisäksi, joka ei siis vaadi erityistä ylipainetta toimiakseen. Öljykammion sisälle muodostuvaa painetta voidaan tarkkailla putken yläpään ennen paineensäätöventtiiliä asennetulla paineanturilla. Kammiossa olevaa öljyä on myös mahdollista kierrättää pumpun avulla putken alaosaan sen yläosaan. Öljyn kierrätyksen tarkoitus on tarvittaessa tehostaa kaasujen liukenemistä öljyyn ja varmistaa liuoksen tasainen koostumus kauttaaltaan. Lisäksi öljyä voimakkaasti kierrättämällä pystytään tehostamaan jo aiemmin öljyyn liuenneiden kaasujen poistoa. Jatkuva kaasunsyöttö



öljytilavuuden läpi liuottaa kaasuja muuuntajaöljyyn hyvin tehokkaasti luoden tasaisen ja stabiilin öljynäytteen. Samankaltaista pulputusmenetelmää on käytetty muissakin alan tutkimuksissa ja myös Cigrén liukoisuustutkimuksissa [52][99]. Aiemmin kuvattuja pulputusmenetelmiä on vain tosin kuvattu hyvin vähän ja ainakaan alan kirjallisuudesta ei löydy mainintaa ohjattavasta laitteistosta, jolla on tarkoitus pystyä valmistamaan erilaisia liuenneiden kaasujen sekoituksia kyseisellä menetelmällä.

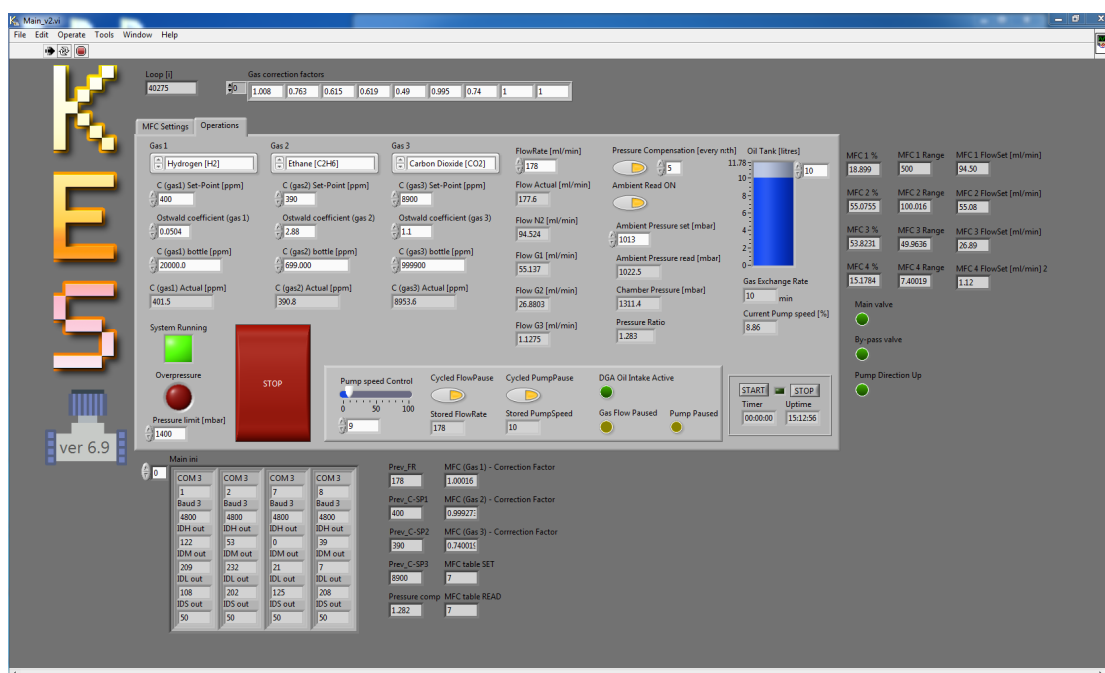


Kuva 18: KES - näytteenvalmistusjärjestelmä.

Kuvassa 16 on esitetty myös kuinka näytteenvalmistuslaitteeseen on mahdollista liittää ainakin kaksi DGA-laitetta yhtäaikaaisesti rinnakkaisvertailua tai testauksen nopeuttamista varten. DGA-laitteiden öljynäytteenottoon on öljysäiliön keskivaiheilla kaksi hanaventtiileillä varustettua putkiläpivienttiä. Öljyn takaisinsyöttöä varten on olemassa kaksi hanaventtiileillä varustettua putkiläpivienttiä öljysäiliön alaosassa. Putkiläpivienttien päät on suojattu öljykammion sisällä, sillä syötettyjen kaasujen kaasukuplien suora pääsy DGA-laitteeseen halutaan estää. Kaasukuplien pääsy DGA-laitteeseen sellaisenaan luonnollisesti vääristää mittaustuloksia. Öljykammion pystyttämiseksi pystysuoraan asentoon käyttöä varten ja muiden komponenttien hyvää asettelua varten näytteenvalmistuslaitteelle suunniteltiin kehikko, johon myös järjestelmän ohjaukseen vaaditut komponentit asennettiin. Suunniteltu kehikko mahdollistaa laitteen käytön omana yksikkönään ja sen, että laitteen operointi on sujuvaa. Kuvassa 18 on esitetty KES - näytteenvalmistusjärjestelmäksi nimetty diplomityön rakennuttu näytteenvalmistuslaite kokonaisuudessaan, lukuunottamatta paineensäätöventtiiliä, jota ei kuvanotto hetkellä ollut kiinnitetty. Massavirtasäätimien tarkkaa ohjausta varten näytteenvalmistuslaitteelle luotiin Labview-pohjainen ohjelmisto, jolla pystytään säätämään kaasujen sekoitussuhdetta helposti ja tarkasti sekä luomaan eri kaasupitoisuuksia öljynäytteeseen ja ohjaamaan sekä lukemaan järjestelmän muita komponentteja. Ohjausohjelmistoa suoritetaan teollisuus-PC:llä, johon on liitetty sarjakommunikaatiolla massavirtasäätimien ohjaus ja erillinen piirilevy, joka hoitaa paineanturin lukemisen, pumpun ohjauksen ja DGA-laitteen signaalien lukemisen. Mitattavalta OPT100 protyyppi DGA-laitteelta luetaan muutamaa ohjausjännitesignaalia sen toimintasyklin tarkistusta varten. Toimintasyklin tarkistusta vaaditaan, jotta ohjelmisto pystyy keskeyttämään öljynäytteen pulputuksen ja öljynkierron DGA-laitteen ottaessa öljynäytettä. Tämä on mahdollistettu, jotta voidaan välttää mahdollinen puhtaan kaasuseoksen kuplien joutuminen DGA-laitteen ottamaan öljynäytteeseen, mikä vaikuttaisi voimakkaasti laitteella mitattuihin kaasupitoisuuksiin. Öljynkierto myös pysäytetään hetkellisesti näytteenottoa varten, jottei näyte laimenisi sinä aikana, kun öljysäiliöön ei jatkuvasti syötetä kaasuja. Ohjelmiston logiikka on toteutettu siten, että sillä on suoraan mahdollista säätää haluttu konsentraatio, kun määritellään käytetty kaasu, sen pullopitoisuus, ostwaldin kerroin ja haluttu kokonaisvirtausnopeus sekä pumpun kiertonopeus. Eli ohjelmisto laskee itse lähtöarvoista tarvittavat kaasujen virtausten säätösuhteet ja aloittaa näytteen valmistuksen. Kuvassa 19 on esitetty ohjelmiston ohjauspaneeli.

## 4.2 Mittausmenetelmät

Diplomityön aikana olleen haastavan aikataulun vuoksi testattavien pitoisuustasojen ja kerättävien mittauspisteiden määrää oli tarpeellista harkita tarkoin. Taulukon 5 arvoihin tavanomaisista liunneiden kaasujen pitoisuuksista muuntajilla perustuen valittiin testattavia kaasupitoisuusarvoja eri kaasuille siten, että pitoisuudet olisivat lähellä epätavanomaista kaasuuntumista osoittavan kaasupitoisuuden rajaa. Tiettyjä myönnytyksiä kuitenkin oli tarpeellista tehdä. Esimerkiksi asetyleenille valittiin huomattavasti suurempi pitoisuus, sillä asetyleenin hyvin matalan ominaispitoisuuden (<3 ppm) riittävän tarkka saavuttaminen on epävarmaa. Hiilimonoksidille puolestaan jouduttiin valitsemaan paljon pienempi pitoisuus, sillä sen korkeiden pitoisuuksien käsittely ja käyttö on hengenvaarallista. Lisäksi johtuen hiilimonoksidin pienestä liukoisuuskertoimesta, sitä vaaditaan noin 8-kertainen



Kuva 19: KES - näytteenvalmistusjärjestelmän ohjelmiston ohjauspaneeli.

pitoisuus haluttua pitoisuutta kohden. Hiilimonoksidin tavanomaisen kaasuuntumisen ylä-raja muuntajassa on noin 500 ppm, jonka valmistamiseen vaaditaan siis 8-kertainen pitoisuus kaasutilavuudessa eli 4000 ppm. Tavallisessa hengitysilmassa jo yli 30 ppm pitoisuudet ovat ihmiselle haitallisia ja yli 1000 ppm pitoisuudet voivat olla tappavia.

Kaasuja valmistettiin syöttämällä niitä niiden konsentraatioista ja liukoisuuksista riippuvista tekijöistä yhtälön 10 mukaisesti siten, että käytetty kokonaisvirtaus oli aina 178 ml/min. Tällä kokonaisvirtauksella kaasutilavuuteen kerääntyvät kaasumäärät vaihtuvat täysin uuteen kaasuun noin 10 minuutin välein. Lisäksi pumpputta käyttiin matalalla nopeudella sekoittamaan öljyä, nopeuttaen koko öljynäytteen saturoitumista haluttuun pitoisuuteen. Näytteiden annettiin tasaantua useimmiten yön yli ja siten että OPT100 prototyypin mittauksen mukaan saavutettiin tasapainotilanne ja pystyttiin keräämään ainakin yli 8 mittauspistettä tasapainotilanteessa.

Näytteiden valmistuksessa käytettiin Cigrén julkaisemia liukoisuuskertoimia mineraaliöljylle +20 °C lämpötilassa, jotka on esitetty taulukossa 1. Liukoisuuskertoimien oikeellisuutta käytetylle öljylle ei ollut mahdollista varmistaa, mutta yhdestä lähteestä käytettyjen liukoisuuskertoimien käyttö vähentää ylimääräistä virhettä. Laboratoriotilan noin +23 °C lämpötila ei todennäköisesti aiheuta merkittävää vääristymää +20 °C määrittelyihin liukoisuuskertoimiin, sillä itse liukoisuuskertoimien arvo on merkittävämmän riippuvainen öljytypistä kuin matalista lämpötilan vaihteluista.

Laboratorioanalyysiä varten lähetetyt näytteet otettiin näytteenvalmistuslaitteesta samanlaisesta venttiilistä kuin missä OPT100 prototyypin öljyn sisääntulo oli kytketty. Eli näytteenottoventtiili oli samalla tasolla kuin OPT100 laitteen öljyn sisäänotto, mutta eri puolella öljykammiota. Mainitun venttiilin alkuperäisenä tarkoituksena on mahdollistaa kahden öljyanalyysilaitteen yhdenaikainen kytkentä samaan öljynäytteeseen, mutta

sitä on mahdollista myös käyttää edustavan öljynäytteen ottamiseen. Öljyn näytteenottoa varten käytettiin 1,1 litran alumiinisia näyteastioita. Näyteastioita täytettäessä öljyä annettiin ensin valua ohi pullosta noin 200 millilitraa, jonka jälkeen näytteenottoletku asetettiin näyteastian pohjalle. Näytteenottoletkun ollessa pohjalla, näytteenottoastia täytettiin ja öljyä annettiin valua astian yli noin 1 litran verran, jonka jälkeen astia suljettiin sille tarkoitettulla alumiinivuoratulla korkilla. Näytteet lähetettiin saman päivän aikana laboratorioon analysoitavaksi. Öljynäytteet analysoi Ruotsissa toimiva VPDiagnose.

Kaasujen poistossa öljykammioon syötettiin tyypeä huomattavasti paljon korkeammalla virtauksella (480 ml/min) ja pumppua käytettiin kolminkertaisella kierrosnopeudella. Tämän tarkoituksena oli tehostaa ja nopeuttaa kaasujen erottumista öljystä. Lisäksi kaasujen poistossa paineensäätöventtiili irroitettiin järjestelmästä, jotta kaasut vapautuisivat voimakkaammin öljystä ja tarpeen mukaan kaasujen irroitusta voimistettiin luomalla kammiioon alipaine tyhjiöpumpulla.

### 4.3 Mittaustulokset

Taulukoissa 14-18 on esitetty valmistettujen näytteiden mittaustuloksia. Mittaustuloksiin on sisällytetty KES-näytteenvalmistuslaitteen ohjearvo, jonka mukaan näyte on valmistettu. Mittaustuloksissa on myös esitetty OPT100 analysaattorilaitteen prototyypin mittaaman laboratorioon lähetetyn näytteenoton lähimmän mittauspisteen pitoisuuslukemat ja taasaantuneen analyysituloksen keskiarvo. Lisäksi mittaustuloksissa on esitetty Vaisalaan riippumattoman ulkopuolisen laboratorion tekemät analyysitulokset.

Taulukossa 14 esitetyssä näytteessä 1 oli valmistettu etyleeniä ja hiilidioksidia sisältävä näyte. Taulukosta voidaan tulkita, että OPT100 prototyypin mukaan ollaan päästy ainakin suhteellisen lähelle haluttuja arvoja, varsinkin etyleenin kohdalla. Laboratorioanalyysin tulos kuitenkin osoittaa hyvin merkittävää eroa haluttujen pitoisuuksien ja prototyypillä mitattujen arvojen välillä.

Taulukko 14: Näytteen 1 mittaustulokset.

|                             | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|
| KES - ohjearvo              | 0              | 0               | 0                             | 170                           | 0                             | 0    | 4000            |
| OPT100 - lähin mittauspiste | 0              | 0               | 10                            | 155                           | 7                             | 0    | 3265            |
| OPT100 - keskiarvo          | 0              | 0               | 10,0                          | 155,3                         | 4,5                           | 0    | 3330,1          |
| Laboratorioanalyysi         | <5             | <0,1            | <0,1                          | 110                           | <0,1                          | <1,0 | 2655            |

Taulukossa 15 esitetyssä näytteessä 2 oli valmistettu vetyä ja asetyleeniä sisältävä näyte. Voidaan havaita, että OPT100 prototyypin mukaan ollaan päästy hyvin lähelle haluttuja arvoja. Esimerkiksi asetyleenin kohdalla ohjearvo vastaa hyvin prototyypin tuloksia. Laboratorioanalyysin tulos kuitenkin osoittaa, että aikaansaatu pitoisuus olisi vain noin puolet halutuista pitoisuuksista ja prototyypillä mitatuista pitoisuuksista.

Taulukossa 16 esitetyssä näytteessä 3 oli valmistettu metaania ja hiilimonoksidia sisältävä näyte. Voidaan havaita, että OPT100 prototyypin mukaan ollaan onnistuttu val-

Taulukko 15: Näytteen 2 mittaustulokset.

|                             | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|
| KES - ohjearvo              | 100            | 0               | 50                            | 0                             | 0                             | 0    | 0               |
| OPT100 - lähin mittauspiste | 90             | 0               | 52                            | 0                             | 22                            | 3    | 11              |
| OPT100 - keskiarvo          | 87,3           | 0               | 51,0                          | 0                             | 19,3                          | 2,3  | 13,6            |
| Laboratorioanalyysi         | 58             | <0,1            | 26                            | <0,1                          | <0,1                          | <1,0 | 13              |

mistamaan näyte lähes täysin haluttuihin arvoihin. Laboratorioanalyysin tulos kuitenkin osoittaa jälleen, että aikaansaadut pitoisuudet olisivatkin lähempänä noin puolta halutuista pitoisuuksista ja prototyypillä mitatuista pitoisuuksista.

Taulukko 16: Näytteen 3 mittaustulokset.

|                             | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|
| KES - ohjearvo              | 0              | 80              | 0                             | 0                             | 0                             | 48   | 0               |
| OPT100 - lähin mittauspiste | 1              | 78              | 0                             | 0                             | 21                            | 49   | 8               |
| OPT100 - keskiarvo          | 1              | 77,3            | 0                             | 0                             | 20,2                          | 48,3 | 13,6            |
| Laboratorioanalyysi         | <5             | 46              | <0,1                          | <0,1                          | <0,1                          | 25   | 20              |

Taulukossa 17 esitetyssä näytteessä 4 oli valmistettu vetyä, etaania ja hiilidioksidia sisältävä näyte. Siitä nähdään, että prototyypin mittaamien tulosten perusteella vedyn liuotus ei ole täysin onnistunut, ja lisäksi havaitaan etaanin liuotuksessa olleen selkeästi ongelmia. Etaanin liuotuksen ongelmiin voi lukeutua vaadittu hyvin matala virtausnopeus, jolloin virheanalyysissä perusteltu näytteenvalmistuksen virhe kasvaa merkittävästi. Toinen etaanin liukenemista selittävä tekijä voi olla liukoisuuskertoimen oletetun arvon ja todellisen arvon suuri ero. Hiilidioksidi on kuitenkin prototyypin mittaamien arvojen mukaan saavuttanut hyvin halutun pitoisuuden. Laboratorioanalyysin tulokset osoittavat kuitenkin lisäongelmia pitoisuuksissa. Analyysin mukaan etaania olisikin lionnut vain noin kolmasosa halutusta ja alle 60 % mitatusta. Lisäksi vedyn ja hiilidioksidin laboratoriotulokset näyttävät olevan noin 40 % matalammat kuin tarkoitettu ja merkittävästi matalammat kuin prototyypillä mitatut.

Taulukossa 18 esitetyssä näytteessä 5 oli valmistettu vetyä, etaania ja hiilidioksidia sisältävä näyte, mutta näyte oli tehty ilman paineensäätöventtiiliä. Näyte siis valmistettiin ilmanpaineessa toisin kuin näytteet 1-4, jotka valmistettiin noin 300 mbarin ylipaineessa. Taulukosta 18 nähdään, että prototyypin mittaamien tulosten perusteella vedyn liuotus oli suhteellisen onnistunut ja, että etaanin liuotuksessa on jälleen selkeästi ongelmia. Lisäksi voidaan havaita, että hiilidioksidin liuotuksessa oli myöskin ongelmia, jotka voivat johtua mitä todennäköisimmin kaasujen karkaamisesta öljykammion hengittäessä vapaasti ilmanpaineeseen. Laboratorioanalyysin tulokset osoittavat kuitenkin jälleen lisäongelmia

pitoisuuksissa. Niiden mukaan etaania olisikin lionnut vain noin kolmasosa halutusta ja alle 70 % mitatusta. Hiilidioksidia on myöskin laboratorioanalyysin mukaan vähemmän kuin mitä olisi pitänyt, mutta prototyypin ja laboratorioanalyysin mittaustulokset eroavat alle 15 %.

Taulukko 17: Näytteen 4 mittaustulokset.

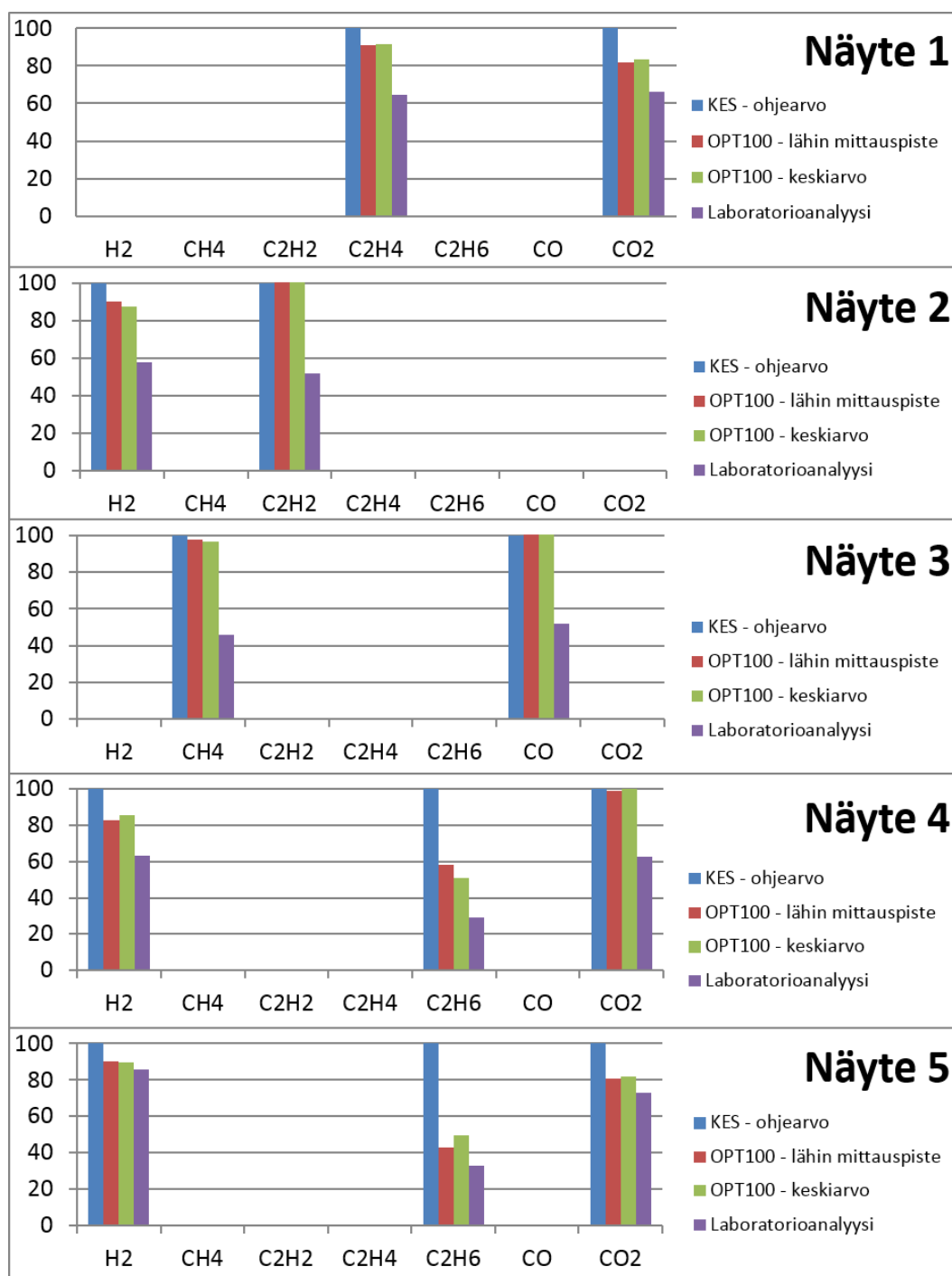
|                             | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO   | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|
| KES - ohjearvo              | 100            | 0               | 0                             | 0                             | 100                           | 0    | 2000            |
| OPT100 - lähin mittauspiste | 83             | 5               | 3                             | 0                             | 58                            | 0    | 1985            |
| OPT100 - keskiarvo          | 85,4           | 3,4             | 3,7                           | 0                             | 51,1                          | 0    | 2024,4          |
| Laboratorioanalyysi         | 63             | <0,1            | <0,1                          | 0,2                           | 29                            | <1,0 | 1250            |

Taulukko 18: Näytteen 5 mittaustulokset (valmistettu ilman ylipainetta).

|                             | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO  | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|-----------------|
| KES - ohjearvo              | 250            | 0               | 0                             | 0                             | 100                           | 0   | 2000            |
| OPT100 - lähin mittauspiste | 226            | 3               | 6                             | 0                             | 43                            | 0   | 1615            |
| OPT100 - keskiarvo          | 224,3          | 3,0             | 5,8                           | 0                             | 49,4                          | 0   | 1640,7          |
| Laboratorioanalyysi         | 215            | <0,1            | <0,1                          | <0,1                          | 33                            | 1,1 | 1460            |

Kuten oli oletettua kaasuja on karannut näytteen 5 näytteenottovaiheessa todennäköisesti vähemmän kuin ylipaineessa valmistettua näytettä 4 otettaessa, mutta etaanin suhde näytteenvalmistuksen ohjearvoon ja laboratorioanalyysin tuloksiin on lähes sama molemmissa näytteissä (noin 30 %). Tämä viittaisi siihen, että näytteen painestuksesta oletettavasti johtuva kaasujen voimakas karkaaminen ei olisi etaanin ja muiden kaasujen oletettua matalamman pitoisuuden syynä. Jos näin olisi, täytyisi myös etaanin näyttämän olla suhteessa korkeampi, kun näyte on valmistettu ilmanpaineessa.

Kuvassa 20 on esitetty eri näytteiden tulokset yhdistettynä. Esitetyt pitoisuudet on normitettu näytteenvalmistuslaitteen ohjearvon mukaan, eli ne esittävät mittaustulosten suhteellista näyttämää verrattuna haluttuun pitoisuuteen. Kuvasta nähdään selkeästi kuinka analysaattorilaitteen mittaama lähin mittapiste ja keskiarvo ovat suuressa osassa näytteiden kaasuja hyvin lähellä haluttuja pitoisuuksia. Suurimmat erot näkyvät etaanin pitoisuuksissa. Lisäksi kuvasta voidaan nähdä kuinka laboratorioanalyysin tulokset ovat joka näytteessä merkittävästi pienemmät. Voidaan myös havaita, että saman näytteen kaasusuhteet poikkeavat laboratorioanalyysin mukaan näytteen ohjearvoista. Esimerkkinä näytteet 4 ja 5 joissa jokaisen kaasun suhteelliset pitoisuudet ovat merkittävästi eroavia ja mielenkiintoisesti voimakkaimmin pakenevaa vetykaasua on laboratorioanalyysin mukaan molemmissa näytteessä suhteellisesti suurempi määrä kuin raskaampia yhdisteitä. Mittaustulokset ovat



Kuva 20: Mittaustulokset normitettuina suhteessa näytteenvalmistuksen ohjearvoon (KES - ohjearvo).

siis jokseenkin kummallisia ja pelkästään saatuja tuloksia katselemalla on hieman hankalaa tehdä vahvoja johtopäätöksiä. Tuloksista herää myös epäilyksiä laboratorionäytteiden valmistuksen virheistä, näytteiden pullotusvaiheesta aiheutuvasta virheestä ja niille suoritettujen laboratorioanalyysien tarkkuuksista.

#### 4.4 Näytteenvalmistuksen epätarkkuus ja epäideaalisuudet

Mittaustulosten perusteella oli syytä arvioida näytteenvalmistuksen epäideaalisuuksia ja virhettä aiheuttavia tekijöitä. Virhetarkastelussa keskityttiin kvantifioitaviin tekijöihin, kuten massavirtasäätimien tarkkuuteen, pullopitoisuuksien tarkkuuteen ja liukoisuuskertoimien tarkkuuteen. Jos liukoisuuskertoimet oletettaisiin virheettömiksi, kullekin liuotetulle kaasulle koostuisi virhe pelkästään massavirtasäätimien tarkkuudesta ja pullopitoisuuden tarkkuudesta. Perustuen kalibroidulla Drycal ML-500 virtausmittarilla tehtyihin mittauksiin yksittäisen massavirtasäätimen enimmäisvirheeksi arvioitiin 1,5 millilitraa minuutissa ja kokonaisvirtauksen tarkkuudeksi 5 millilitraa minuutissa. Tarkempi perustelu annetuille virtausnopeuksien virheille on esitetty liitteessä B. Pullopitoisuuksien tarkkuudet  $\delta C_B$  on ilmoitettu AGA:lta toimitetuissa kaasupulloissa. Näihin arvoihin perustuen käyttämällä virheen etenemislakia voidaan laskea eri kaasujen öljyyn liuenneiden pitoisuuksien virherajat. Virheen etenemislaki on määritelty seuraavasti:

$$\delta q = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial q}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}, \quad (11)$$

missä  $q$  on useiden muuttujien  $x_i$  funktio,  $\delta x_i$  on muuttujien  $x_i$  virheet ja  $\delta q$  on funktion  $q$  virhelauseke [103]. Taulukossa 1 esitettyjen 20 °C ja 25 °C liukoisuuskertoimien tarkastelun ja pohdinnan jälkeen muodostettiin oletus, että liukoisuuskertoimien virhe itsessään on noin 21 %. Tarkempi perustelu liukoisuuskertoimien virheelle on esitetty liitteessä A. Tämän oletuksen ja muiden arvioitujen virheiden ja yhtälön 11 avulla on laskettu kaasujen öljyyn liuenneille pitoisuuksille pitoisuusvirheitä ja haluttuun pitoisuuteen suhteellisia virheitä ( $\delta C_L$ , ppm-arvoina ja prosentteina), jotka on esitetty taulukossa 19. Taulukossa 19 on eritelty virhearviot, joissa on otettu huomioon liukoisuuskertoimien virhe  $\delta C_{L, Ost}$  ja virherajat, joissa on otettu huomioon vain muut tekijät  $\delta C_L$ . Lisäksi taulukossa 19 on ilmoitettu pullopitoisuuksien tarkkuus  $\delta C_B$  ja käytetty pullopitoisuus  $C_B$ , jotka eroavat kaasuittain. Tarkempi selostus tästä laskuprosessista on esitetty liitteessä C. Tarkasteltaessa taulukkoa 19 voidaan havaita, että suurimmat virheet syntyvät varsinkin asetyleenin ja etaanin pienemmillä pitoisuuksilla. Tämä johtuu käytettyjen pullopitoisuuksien ja liukoisuuskertoimien aiheuttamasta hyvin pienestä virtausnopeudesta, jolloin massavirtasäätimien aiheuttama näytteen suhteellinen virhe on paljon suurempi. Taulukosta 19 nähdään myös kuinka merkittävimmäksi virhetekijäksi nousee liukoisuuskertoimien epävarmuus.

Yksi mahdollinen lisävirhettä aiheuttava tekijä on kaasujen haihtuminen niiden siirtyessä näytteenvalmistuslaitteesta analysaattoriin. Koejärjestelyssä OPT100 prototyyppi on yhdistetty näytteenvalmistusjärjestelmään taipuisilla 6 mm teflonputkilla, joiden pituus on noin 165 cm. Käytettyjen teflonputkien sisähalkaisija on 4 mm, josta pituuden avulla voidaan laskea putken sisätilavuudeksi 20,7 millilitraa. Pisimmän öljyn seisonnan toimintavaiheessa analysaattoriprototyypin analysoitavaksi kerralla ottaman öljynäytteen tilavuus on noin 8,5 desilitraa. Öljyn seistessä teflonputkessa analysaattorin näytteenottojen välissä on todennäköistä, että ainakin osa pienemmistä kaasuyhdisteistä voi diffundoitua teflonputken läpi pois öljystä. Laskennallisesti vaikka koko putken sisällöstä haihtuisi kaikki kaasut, virhe olisi suhteellisen pieni johtuen analysoitavaksi otettavan öljynäytteen kokonaistilavuuden suhteesta öljyputkessa seisovaan verrattain pieneen määrään öljyä. Joten koko öljynäytteen voimakas laimentuminen kyseisen öljyn sisäänoton teflonputken kautta on



Taulukko 19: KES-näytteenvalmistuslaitteelle virheen etenemislain mukaisesti lasketut virheet huomioimatta liukoisuuskertoimien virheen vaikutusta  $\delta C_L$  ja liukoisuuskertoimien virheen vaikutus huomioon ottaen  $\delta C_{L, Ost}$ .

| Kaasu                         | $C_B$   | $\delta C_B$ | $C_L$<br>[ppm] | $\delta C_L$<br>[ppm] | $\delta C_L$<br>[%] | $\delta C_{L, Ost}$<br>[ppm] | $\delta C_{L, Ost}$<br>[%] |
|-------------------------------|---------|--------------|----------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | ±2,0 %       | 100            | ±9,2                  | ±9 %                | ±22,0                        | ±22 %                      |
|                               |         |              | 400            | ±16,2                 | ±4 %                | ±81,6                        | ±20 %                      |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | ±2,0 %       | 80             | ±7,5                  | ±9 %                | ±18,4                        | ±23 %                      |
|                               |         |              | 200            | ±9,8                  | ±5 %                | ±43,1                        | ±22 %                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | ±2,0 %       | 10             | ±2,1                  | ±21 %               | ±3,0                         | ±30 %                      |
|                               |         |              | 50             | ±2,7                  | ±5 %                | ±10,8                        | ±22 %                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 170            | ±11,7                 | ±7 %                | ±37,6                        | ±22 %                      |
|                               |         |              | 505            | ±17,9                 | ±4 %                | ±107,6                       | ±21 %                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 55             | ±17,1                 | ±31 %               | ±20,6                        | ±37 %                      |
|                               |         |              | 100            | ±17,2                 | ±17 %               | ±27,2                        | ±27 %                      |
| CO                            | 0,1 %   | ±0,5 %       | 50             | ±1,8                  | ±4 %                | ±10,6                        | ±21 %                      |
|                               |         |              | 100            | ±3,0                  | ±3 %                | ±21,2                        | ±21 %                      |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | ±0,5 %       | 2000           | ±73,5                 | ±4 %                | ±426,4                       | ±21 %                      |
|                               |         |              | 4000           | ±123,2                | ±3 %                | ±849,0                       | ±21 %                      |

hyvin epätodennäköistä ja sen vuoksi se ei todennäköisesti pysty aiheuttamaan ainakaan yli 5 prosentin virhettä mittaukseen. Tosin käytettäessä hyvin hidasta kaasuvirtausta (alle 10 ml/min) on mahdollista, että varsinkin voimakkaasti teflonin läpi diffusoituvat kaasut ovat voineet osittain paeta kaasupullon ja massavirtasäätimen välisissä teflonputkissa. Hitaammilla virtausnopeuksilla ja pienillä pitoisuuksilla on myös näytteenvalmistuksessa aiheutuva virhe paljon suurempi, kuten aiemmin todettua.

Laboratorioanalyysin tuloksiin on myös voinut vaikuttaa voimakkaasti öljykammioon tarkoituksella järjestetty ylipaine. Öljykammiossa on kokeiden aikana ylläpidetty noin 300 millibaarin ylipainetta. Laitteessa käytettyjen paineantureiden avulla mitattu öljykammion sisäisen paineen ja laboratoriontilan ilmanpaineen suhde pysyi suurimman osan tasaisesti suhteessa 1,28. Tällöin öljyyn teoreettisesti pitäisi liueta noin 28 % enemmän kaasuja kuin ilmanpaineessa. Tästä johtuen, kun öljykammioista on otettu öljynäytteitä laboratorioanalyysia varten, on mahdollista, että öljynäytteestä pakenee tavanomaista voimakkaammin 28 % liuenneista kaasuista. Öljynäytteille tehdyt laboratoriomittaukset suoritettiin myös todennäköisimmin ilmanpaineessa, jolloin kaasujen pakenemisen mahdollisuus toistuu mittauksia tehdessä.

## 5 Johtopäätökset

Diplomityössä tarkasteltiin suurjännitelaitteiden kunnonvalvonnan periaatteita ja perehdyttiin öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysiin sekä siihen liittyviin tekijöihin kirjallisuuden pohjalta. Diplomityön pääkohteena olleen Vaisalan tuotekehityksen OPT100 analysaattorilaitteen prototyypin mittauskäyttöä ja tarkkuutta tutkittiin suunnitteleamalla ja valmistamalla öljynäytteenvalmistuslaite. Kyseisellä näytteenvalmistuslaitteella on mahdollista valmistaa analysaattorilaitteelle mitattavia öljynäytteitä, joihin on liuotettu kaasuja haluttuihin pitoisuuksiin.

Diplomityön aikana tehdyn näytteenvalmistuslaitteen valmistaminen vaati paljon aiheeseen perehtymistä ja erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen tutkimista. Lisäksi työn edetessä ilmaantuneet lukuisat ongelmat kyettiin ratkaisemaan sääntillisen tutkimus- ja kehitystyön avulla, turvautuen tarvittaessa tuotekehityksen ammattilaisten apuun, näkemyksiin ja tietämykseen aihealueesta. Näytteenvalmistuslaite ja sen ohjausta varten tehty ohjelmisto onnistuttiin valmistamaan diplomityölle sovitun aikataulun mukaisesti. Laitteistolla kyettiin tekemään mitattavia öljynäytteitä, joita pystyttiin mittaamaan työn aikataulun puitteissa. Valmistettuja näytteitä mitattiin analysaattorilaitteen prototyypillä ja lisäksi näytteitä lähetettiin laboratorioanalyysijä varten Vaisalan ulkopuoliselle laboratoriolle.

Saatujen mittaustulosten perusteella kyettiin varmistamaan analysaattorilaitteen mittauskäyttö ja näytteenvalmistuslaitteen käyttö valmistaa näytteitä. Mittaustulosten perusteella tosin ei ole mahdollista tehdä suoraviivaisia toteamuksia valmistetun näytteenvalmistuslaitteen näytteenvalmistuskäytön tarkkuudesta tai tutkittavan analysaattoriprototyypin mittaustarkkuudesta. Mittaustarkkuuden ja näytteenvalmistuksen tarkkuuden tutkinta vaatisi lisää kokeiluja, testausta ja käytettyjen menetelmien parannusta. Diplomityössä valmistetulla näytteenvalmistuslaitteistolla ja käytetyillä menetelmillä on kuitenkin saatujen tulosten perusteella verrattain merkittävää potentiaalia kehittyä tehokkaaksi ja toimivaksi tavaksi testata analysaattorilaitteita.

Liukoisuuskertoimien aiheuttama epävarmuus on todennäköisimmin kaikista suurin epävarmuustekijä koko näytteenvalmistuksessa, sillä menetelmässä joudutaan käyttämään niiden arvioita. Myöhempiä tutkimusta varten on erittäin tärkeää selvittää käytetyn öljyn kaasujen liukoisuuskertoimet tarkempia mittaustuloksia varten. Jos tämä kyseinen epäkohta jätetään pois ja arvioidaan lähinnä järjestelmän kykyä valmistaa mitattavia näytteitä halutuissa pitoisuuksissa, voidaan todeta, että aikatauluun suhteutettuna ollaan päästy lupaaviin tuloksiin. Suunniteltu ja valmistettu näytteenvalmistuslaite kykenee valmistamaan halutuista kaasuista näytteitä, joita on mahdollista analysoida analysaattorilaitteella. Käytetty analysaattorilaitte, joka jo aiemmin muissa testauslaitteistoissa on näyttänyt hyviä tuloksia, näyttää kohtuullisen hyviä tuloksia verrattuna valmistettuun näytteeseen. Samoista näytteistä tehtyjen laboratorioanalyysien tulokset ovat kuitenkin hyvin hämmentäviä. Niiden perusteella näytteistyksessä on paljonkin pielessä. Ottaen huomioon laboratorioden keskimääräisen  $\pm 15 \%$  mittaustarkkuuden, ylipaineessa valmistettujen näytteiden voimistuneen kaasujen pakenemisen, näytteenvalmistuslaitteen oman epätarkkuuden ja liukoisuuskertoimien epävarmuuden on täysin mahdollista, että laboratorioanalyysin tulos on täysin oikea ja laitteiston epävarmuus on oletettua suurempi. Varsinaista juurisyytä näille tulosten merkittävälle eroille on muuttujien ja tuntemattomien tekijöiden paljouden vuoksi hankalaa paikantaa nykyisillä tiedoilla.

Tulevaisuudessa tapahtuvaa tutkimusta ja kehitystä varten on pyritty keksimään erilaisia kehityskeinoja laitteistoon ja tutkimuksen etenemisen loogisia seuraavia vaiheita. Kuten jo mainittua, ensisijaista luotettavan toiminnan takaamiseksi olisi määrittää käytetyn öljyn liukoisuuskertoimet hyvällä tarkkuudella. Lisäksi laitteistoon voisi tehdä muutamia virhettä parantavia muutoksia. Esimerkiksi massavirtasäätimien vaihto uusiin ja kalibroituihin vaikuttaisi jo laskelmienkin perusteella merkittävästi suorituskyykyyn. Näytteenvalmistuslaitteeseen olisi myös mahdollista lisätä ohjattava venttiili kaasun ulostuloon, jolloin näytteiden valmistus ilman mekaanista paineensäätöventtiiliä olisi varmempaa. Laboratorioanalyysin virheen ja epävarmuuden tarkastelun vähentämiseksi olisi mahdollista lähettää kahdelle eri laboratoriolle sama näyte, jolloin saatavia tuloksia olisi mahdollista vertailla. Vertailulla pystyttäisiin arvioimaan laboratorioden tekemien analyysien luotettavuutta. Työssä käytetyn laboratorion kaukainen sijainti voi olla myös vaikuttanut tuloksiin kaasujen karkaamisen ajanjakson keston pidentymisen vuoksi, jonka vuoksi Suomen sisällä toimivaa laboratorioita olisi hyvä harkita. Myöskin itse näytteenottotapaa olisi ehkä mahdollista parantaa. Työn aikana tehdyissä näytteenotoissa noudatettiin öljynäytteenoton hyviä periaatteita, mutta kaasujen karkaamista näytteestä voisi olla mahdollista vähentää erilaisella menettelyllä.

Diplomityön tuloksilla on luotu hyvä pohjatilanne jatkotutkimuksia varten. Toteuttamalla kehitysajatuksia sekä uusia mittauksia, voidaan aikaansaada merkittävää uutta tutkimusta, jonka avulla on mahdollista edistää Vaisalan tuotekehityksen työtä ja sitä kautta parantaa yrityksen tuotteita. Diplomityön loppuvaiheessa käytyjen keskustelujen perusteella tutkimustyötä tullaan edelleen jatkamaan tuotekehitystiimissä.

## Viitteet

- [1] Cigré, “Guide for transformer maintenance”, *WG A2.34, TB*, vol. 445, 2011.
- [2] M. Duval, “Dissolved gas analysis: It can save your transformer”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 5, nro 6, s. 22–27, 1989, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/57.44605](https://doi.org/10.1109/57.44605).
- [3] C. Perrier, M. Marugan ja A. Beroual, “DGA comparison between ester and mineral oils”, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 19, nro 5, s. 1609–1614, 2012.
- [4] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen ja V. Palva, *Suurjännitetechniikka*, 4. painos. Otatieto, 2015, ISBN: 978-951-672-375-7.
- [5] “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers”, *IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, s. 1–36, 2009. DOI: [10.1109/IEEESTD.2009.4776518](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.4776518).
- [6] “IEEE Guide for Installation and Maintenance of Liquid-Immersed Power Transformers”, *IEEE Std C57.93-2007 (Revision of IEEE Std C57.93-1995)*, s. 1–60, 2008. DOI: [10.1109/IEEESTD.2008.4480894](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4480894).
- [7] “IEEE Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components”, *IEEE Std C57.143-2012*, s. 1–83, 2012. DOI: [10.1109/IEEESTD.2012.6387561](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6387561).
- [8] Cigré, “Transformer reliability survey”, *WG A2.37, TB*, vol. 642, 2015.
- [9] Cigre, “Guide on Economics of Transformer Management”, *WG A2.20, TB*, vol. 248, 2004.
- [10] “IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment”, *IEEE Std C57.106-2015 (Revision of IEEE Std C57.106-2006)*, s. 1–38, 2016. DOI: [10.1109/IEEESTD.2016.7442048](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7442048).
- [11] Cigré, “Life Management Techniques for Power Transformer”, *WG A2.18, TB*, vol. 227, 2003.
- [12] Cigré, “Ageing of Cellulose in Mineral-oil Insulated Transformers”, *WG D1.01.10, TB*, vol. 323, 2007.
- [13] R. J. Moon, A. Martini, J. Nairn, J. Simonsen ja J. Youngblood, “Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites”, *Chemical Society Reviews*, vol. 40, nro 7, s. 3941–3994, 2011.
- [14] D. Klemm, B. Heublein, H.-P. Fink ja A. Bohn, “Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material”, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 44, nro 22, s. 3358–3393, 2005.
- [15] J. Unsworth ja F. Mitchell, “Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, nro 4, s. 737–746, 1990, ISSN: 0018-9367. DOI: [10.1109/14.57098](https://doi.org/10.1109/14.57098).

- [16] J. P. van Bolhuis, E. Gulski ja J. J. Smit, "Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, nro 2, s. 528–536, 2002, ISSN: 0885-8977. DOI: [10.1109/61.997930](https://doi.org/10.1109/61.997930).
- [17] A. M. Emsley, X. Xiao, R. J. Heywood ja M. Ali, "Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: effects of oxygen and water on ageing in oil", *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, nro 3, s. 115–119, 2000, ISSN: 1350-2344. DOI: [10.1049/ip-smt:20000021](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000021).
- [18] I. G.T. C. Services, *A guide to transformer oil analysis*, Web-julkaisu: [http://www.satcs.co.za/Transformer\\_Oil\\_Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer_Oil_Analysis.pdf), Viitattu: 17.6.2016, 2005.
- [19] N. Lelekakis, W. Guo, D. Martin, J. Wijaya ja D. Susa, "A field study of aging in paper-oil insulation systems", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, nro 1, s. 12–19, 2012, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2012.6130527](https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6130527).
- [20] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell ja T. J. Painter, "Aging of oil-impregnated paper in power transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, nro 1, s. 230–239, 2004, ISSN: 0885-8977. DOI: [10.1109/TPWRD.2003.820175](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820175).
- [21] T. K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, nro 5, s. 903–917, 2003, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2003.1237337](https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1237337).
- [22] A. M. Emsley ja G. C. Stevens, "Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers", *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 141, nro 5, s. 324–334, 1994, ISSN: 1350-2344. DOI: [10.1049/ip-smt:19949957](https://doi.org/10.1049/ip-smt:19949957).
- [23] D. H. Shroff ja A. W. Stannett, "A review of paper aging in power transformers", *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 132, nro 6, s. 312–319, 1985, ISSN: 0143-7046. DOI: [10.1049/ip-c.1985.0052](https://doi.org/10.1049/ip-c.1985.0052).
- [24] R. Liao, S. Liang, C. Sun, L. Yang ja H. Sun, "A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil", *European transactions on electrical power*, vol. 20, nro 4, s. 518–533, 2010.
- [25] A. Emsley, M. Ali ja R. Heywood, "A size exclusion chromatography study of cellulose degradation", *Polymer*, vol. 41, nro 24, s. 8513–8521, 2000, ISSN: 0032-3861. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00243-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00243-3). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386100002433>.

- [26] A. M. Emsley, R. J. Heywood, M. Ali ja X. Xiao, “Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 4: Effects of ageing on the tensile strength of paper”, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, nro 6, s. 285–290, 2000, ISSN: 1350-2344. DOI: [10.1049/ip-smt:20000644](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000644).
- [27] “IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators”, *IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995)*, s. 1–123, 2012. DOI: [10.1109/IEEESTD.2012.6166928](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6166928).
- [28] M. K. Pradhan ja T. S. Ramu, “On the estimation of elapsed life of oil-immersed power transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nro 3, s. 1962–1969, 2005, ISSN: 0885-8977. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.848663](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848663).
- [29] A. M. Emsley, X. Xiao, R. J. Heywood ja M. Ali, “Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: formation of furan products in insulating oil”, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, nro 3, s. 110–114, 2000, ISSN: 1350-2344. DOI: [10.1049/ip-smt:20000259](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000259).
- [30] I. Hohlein ja A. J. Kachler, “Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, nro 5, s. 20–24, 2005, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2005.1513426](https://doi.org/10.1109/MEI.2005.1513426).
- [31] A. J. Kachler ja I. Hohlein, “Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, nro 2, s. 15–21, 2005, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2005.1412215](https://doi.org/10.1109/MEI.2005.1412215).
- [32] Cigré, “Thermal Performance of Transformers”, *WG A2.24, TB*, vol. 393, 2009.
- [33] L. E. Lundgaard, W. Hansen ja S. Ingebrigtsen, “Ageing of Mineral Oil Impregnated Cellulose by Acid Catalysis”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, nro 2, s. 540–546, 2008, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2008.4483475](https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483475).
- [34] X. Zhang ja E. Gockenbach, “Asset-Management of Transformers Based on Condition Monitoring and Standard Diagnosis [Feature Article]”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, nro 4, s. 26–40, 2008, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2008.4581371](https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4581371).
- [35] N. Azis, D. Zhou, Z. D. Wang, D. Jones, B. Wells ja G. M. Wallwork, “Operational condition assessment of in-service distribution transformers”, teoksessa *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on*, 2012, s. 1156–1159. DOI: [10.1109/CMD.2012.6416364](https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416364).

- [36] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi ja E. Gockenbach, “Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers.1. Investigation of mixed liquids”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, nro 3, s. 18–31, 2002, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2002.1014964](https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1014964).
- [37] O. Koreh, K. Torkos, M. B. Mahara, J. Boressay ja V. Izvekov, “Study of water clusters in insulating oils by Fourier transform infrared spectroscopy”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, nro 6, s. 896–902, 1998, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/94.740773](https://doi.org/10.1109/94.740773).
- [38] Y. Du, M. Zahn, B. C. Lesieutre, A. V. Mamishev ja S. R. Lindgren, “Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 15, nro 1, s. 11–20, 1999, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/57.744585](https://doi.org/10.1109/57.744585).
- [39] T. V. Oommen, “Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, nro 10, s. 3062–3067, 1984, ISSN: 0018-9510. DOI: [10.1109/TPAS.1984.318326](https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318326).
- [40] S. Deepa, R. Sarathi ja A. K. Mishra, “Synchronous fluorescence and excitation emission characteristics of transformer oil ageing”, *Talanta*, vol. 70, nro 4, s. 811 –817, 2006, A collection of Papers Presented at the 1st Workshop of the European Union: Analysis and Removal of Contaminants from Wastewaters for the Implementation of the Water Framework Directive1st {EMCO} 2005, ISSN: 0039-9140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2006.01.045>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003991400600124X>.
- [41] V. M. Montsinger, “Loading Transformers By Temperature”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 49, nro 2, s. 776–790, 1930, ISSN: 0096-3860. DOI: [10.1109/T-AIEE.1930.5055572](https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1930.5055572).
- [42] T. W. Dakin, “Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, nro 1, s. 113–122, 1948, ISSN: 0096-3860. DOI: [10.1109/T-AIEE.1948.5059649](https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1948.5059649).
- [43] V. M. Montsinger ja P. M. Ketchum, “Emergency Overloading or Air-Cooled Oil-Immersed Power Transformers by Hot-Spot Temperatures”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 61, nro 12, s. 906–916, 1942, ISSN: 0096-3860. DOI: [10.1109/T-AIEE.1942.5058462](https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1942.5058462).
- [44] K. J. Laidler, “The development of the Arrhenius equation”, *Journal of Chemical Education*, vol. 61, nro 6, s. 494, 1984. DOI: [10.1021/ed061p494](https://doi.org/10.1021/ed061p494).
- [45] “Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials”, *IEC Standard 60076-14*, 2013.
- [46] Cigré, “Copper Sulphide in Transformer Insulation”, *WG A2.32, TB*, vol. 378, 2009.

- [47] “Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to interpretation of dissolved and free gas analysis”, *IEC Standard 60599*, 2007.
- [48] T. V. Oommen, “Adjustments to Gas-in-Oil Analysis Data Due to Gas Distribution Possibilities in Power Transformers”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, nro 6, s. 1716–1722, 1982, ISSN: 0018-9510. DOI: [10.1109/TPAS.1982.317224](https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317224).
- [49] C. Young, R Battino ja H. Clever, “The solubility of gases in liquids: introductory information”, *Nitrogen and Air, solubility data series*, vol. 10, [http://srdata.nist.gov/solubility/IUPAC/SDS-27-28/SDS-27-28-intro\\_12.pdf](http://srdata.nist.gov/solubility/IUPAC/SDS-27-28/SDS-27-28-intro_12.pdf).
- [50] R. Battino ja H. L. Clever, “The Solubility of Gases in Liquids”, *Chemical Reviews*, vol. 66, nro 4, s. 395–463, 1966. DOI: [10.1021/cr60242a003](https://doi.org/10.1021/cr60242a003).
- [51] R. Battino, “The Ostwald coefficient of gas solubility”, *Fluid Phase Equilibria*, vol. 15, nro 3, s. 231–240, 1984, ISSN: 0378-3812. DOI: [10.1016/0378-3812\(84\)87009-0](https://doi.org/10.1016/0378-3812(84)87009-0).
- [52] Cigré, “DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria”, *WG D1.32, TB*, vol. 443, 2010.
- [53] “Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases”, *IEC Standard 60567*, 2005.
- [54] M. Eklund, “Mineral insulating oils; functional requirements, specifications and production”, teoksessa *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, s. 68–72. DOI: [10.1109/ELINSL.2006.1665259](https://doi.org/10.1109/ELINSL.2006.1665259).
- [55] A. Sierota ja J. Rungis, “Electrical insulating oils. I. Characterization and pre-treatment of new transformer oils”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11, nro 1, s. 8–20, 1995, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/57.342040](https://doi.org/10.1109/57.342040).
- [56] J. Jalbert, R. Gilbert, P. Tetreault, ja M. A. E. Khakani, “Matrix Effects Affecting the Indirect Calibration of the Static Headspace-Gas Chromatographic Method Used for Dissolved Gas Analysis in Dielectric Liquids”, *Analytical Chemistry*, vol. 75, nro 19, s. 5230–5239, 2003. DOI: [10.1021/ac0343634](https://doi.org/10.1021/ac0343634).
- [57] ASTM, “Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography”, *D 3612, 2004: ASTM International Standard*, 2004.
- [58] I. Hohlein-Atanasova ja R. Frotscher, “Carbon oxides in the interpretation of dissolved gas analysis in transformers and tap changers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, nro 6, s. 22–26, 2010, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2010.5599976](https://doi.org/10.1109/MEI.2010.5599976).
- [59] “IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors”, *IEEE Std C57.152-2013*, s. 1–121, 2013. DOI: [10.1109/IEEESTD.2013.6544533](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6544533).



- [60] A. Mehta, R. N. Sharma ja S. Chauhan, “Partial discharge study by monitoring key gases of power transformers”, teoksessa *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on*, vol. 4, 2011, s. 183–186. DOI: [10.1109/ICECTECH.2011.5941883](https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941883).
- [61] AGA, *Erikoiskaasut, AGA:n kaasuturvallisuuskoulutus*, Koulutusmateriaali, 2016.
- [62] I. Atanasova-Höhlein ja R. Fritsche, “Interpretation of carbon monoxide formation in liquid impregnated equipment”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, nro 2, s. 922–926, 2016, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2015.005630](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005630).
- [63] M. Duval, *Smart Grid Monitoring of Transformers by DGA*, CIGRE Thailand, Bangkok, Saatavilla [http://www.cigre-thailand.org/tncf/events/jwg\\_a2\\_d1\\_47/smart\\_grid\\_monitoring\\_by\\_duval.pdf](http://www.cigre-thailand.org/tncf/events/jwg_a2_d1_47/smart_grid_monitoring_by_duval.pdf), Viitattu 17.7.2016, 2013.
- [64] I. Atanasova-Höhlein, “Straygassing of insulating liquids - Manifestation and influence on diagnostics”, teoksessa *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, 2014, s. 1–3. DOI: [10.1109/ICDL.2014.6893077](https://doi.org/10.1109/ICDL.2014.6893077).
- [65] M. Duval ja L. Lamarre, “The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers”, *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 30, nro 6, s. 9–12, 2014.
- [66] M. Duval, “The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, nro 24, s. 22–29, 2008.
- [67] M. Duval ja A. dePabla, “Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, nro 2, s. 31–41, 2001, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/57.917529](https://doi.org/10.1109/57.917529).
- [68] M. Duval, “Calculation of DGA limit values and sampling intervals in transformers in service”, *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 24, nro 5, s. 7–13, 2008.
- [69] Cigré, “Recent Developments in DGA interpretation”, *Joint Task Force D1.01/A2.11, TB*, vol. 296, 2006.
- [70] J. Weesmaa, M. Sterner, B. Pahlavanpour, L. Bergeld ja J. Nunes, “Study about stray gas generation in transformer oil at different temperatures”, teoksessa *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, 2014, s. 1–8. DOI: [10.1109/ICDL.2014.6893096](https://doi.org/10.1109/ICDL.2014.6893096).
- [71] D. Martin, N. Lelekakis, J. Wijaya, M. Duval ja T. Saha, “Investigations into the stray gassing of oils in the fault diagnosis of transformers”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 29, nro 5, s. 2369–2374, 2014.

- [72] S. Besner, J. Jalbert ja B. Noirhomme, “Unusual ethylene production of in-service transformer oil at low temperature”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, nro 6, s. 1901–1907, 2012, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2012.6396946](https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6396946).
- [73] I. Atanasova-Hohlein, “Stray gassing cases of insulating liquids in HV equipment”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, nro 5, s. 2718–2722, 2015, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2015.005220](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005220).
- [74] Cigré, “Oxidation Stability of Insulating Fluids”, *WG D1.30, TB*, vol. 526, 2013.
- [75] R. R. Rogers, “IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, nro 5, s. 349–354, 1978, ISSN: 0018-9367. DOI: [10.1109/TEI.1978.298141](https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141).
- [76] M. Duval, “A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, nro 3, s. 8–17, 2002, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2002.1014963](https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1014963).
- [77] M. Duval, “DGA Challenges at ASTM, IEEE and CIGRE”, Konferenssikalvot, IEEE, Dallas, TX, USA: IEEE PES Transmission, Distribution Conference ja Exposition (T & D), toukokuu 2016.
- [78] M. Duval, *New frontiers of DGA interpretation for power transformers and their accessories*, Saatavilla [www.seeei.org/el2012/article/art/fam2-4.doc](http://www.seeei.org/el2012/article/art/fam2-4.doc), Viitattu 1.8.2016, 2012.
- [79] Imad-U-Khan, Z. Wang, I. Cotton ja S. Northcote, “Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 23, nro 5, s. 5–14, 2007, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2007.4318269](https://doi.org/10.1109/MEI.2007.4318269).
- [80] I. B. M. Taha, S. S. M. Ghoneim ja H. G. Zaini, “Improvement of Rogers four ratios and IEC Code methods for transformer fault diagnosis based on Dissolved Gas Analysis”, teoksessa *North American Power Symposium (NAPS), 2015*, 2015, s. 1–5. DOI: [10.1109/NAPS.2015.7335098](https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335098).
- [81] A. xin Zhao, X. jun Tang, Z. hua Zhang ja J. hua Liu, “The DGA interpretation method using relative content of characteristic gases and gas-ratio combinations for fault diagnosis of oil-immersed power transformers”, teoksessa *Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2014 International Symposium on*, 2014, s. 124–127. DOI: [10.1109/ISEIM.2014.6870736](https://doi.org/10.1109/ISEIM.2014.6870736).
- [82] D. R. Morais ja J. G. Rolim, “A hybrid tool for detection of incipient faults in transformers based on the dissolved gas analysis of insulating oil”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nro 2, s. 673–680, 2006, ISSN: 0885-8977. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.864044](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.864044).

- [83] S. w. Kim, S. j. Kim, H. d. Seo, J. r. Jung, H. j. Yang ja M. Duval, “New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: application of gas-ratio combinations”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, nro 2, s. 685–690, 2013, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2013.6508773](https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508773).
- [84] S. j. Lee, Y. m. Kim, H. d. Seo, J. r. Jung, H. j. Yang ja M. Duval, “New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: application of relative content of fault gases”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, nro 2, s. 691–696, 2013, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2013.6508774](https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508774).
- [85] E. J. Kadim, C. F. Hee, N. Azis, J. Jasni, S. A. Ahmad ja M. Z.A. A. Kadir, “Dissolved gas analysis of transformers based on rough set and fuzzy logic methods”, teoksessa *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2015, s. 268–271. DOI: [10.1109/CENCON.2015.7409552](https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409552).
- [86] D. E. A. Mansour, “Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, nro 5, s. 2507–2512, 2015, ISSN: 1070-9878. DOI: [10.1109/TDEI.2015.004999](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004999).
- [87] L. Wang, X. Zhao, J. Pei ja G. Tang, “Transformer fault diagnosis using continuous sparse autoencoder”, *SpringerPlus*, vol. 5, nro 1, s. 1–13, 2016, ISSN: 2193-1801. DOI: [10.1186/s40064-016-2107-7](https://doi.org/10.1186/s40064-016-2107-7). url: <http://dx.doi.org/10.1186/s40064-016-2107-7>.
- [88] R. A. Hooshmand, M. Parastegari ja Z. Forghani, “Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, nro 5, s. 32–42, 2012, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2012.6268440](https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6268440).
- [89] S. Souahlia, K. Bacha ja A. Chaari, “{MLP} neural network-based decision for power transformers fault diagnosis using an improved combination of Rogers and Doernenburg ratios {DGA}”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, nro 1, s. 1346–1353, 2012, ISSN: 0142-0615. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.067>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512002578>.
- [90] S. Singh ja M. Bandyopadhyay, “Duval triangle: A Noble technique for DGA in power transformers”, *International Journal of Electrical and Power Engineering*, vol. 4, nro 3, s. 193–197, 2010.
- [91] N. A. Muhamad, B. T. Phung, T. R. Blackburn ja K. X. Lai, “Comparative Study and Analysis of DGA Methods for Transformer Mineral Oil”, teoksessa *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, s. 45–50. DOI: [10.1109/PCT.2007.4538290](https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538290).

- [92] N. A. Bakar, A. Abu-Siada ja S. Islam, “A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, nro 3, s. 39–49, 2014, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2014.6804740](https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6804740).
- [93] M. Duval ja J. Dukarm, “Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, nro 4, s. 21–27, 2005, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2005.1489986](https://doi.org/10.1109/MEI.2005.1489986).
- [94] Cigré, “Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment”, *WG D1.01, TB*, vol. 409, 2010.
- [95] B. Kellison, *Transformer monitoring markets, 2013-2020*: 2013.
- [96] J. C. Dennison ja J. M. Trout, “Transformer oil DGA monitoring technology study 2015”, teoksessa *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*, 2016, s. 1–5. DOI: [10.1109/TDC.2016.7519918](https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7519918).
- [97] J. Chou, *Hazardous gas monitors: a practical guide to selection, operation and applications*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2000, ISBN: 0-07-135876-5.
- [98] T. Cargol, “An overview of online oil monitoring technologies”, Weidmann-ACTI Inc, San Antonio: Fourth Annual Weidmann-ACTI Technical Conference, 2005.
- [99] Z. Mao ja J. Wen, “Detection of dissolved gas in oil-insulated electrical apparatus by photoacoustic spectroscopy”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, nro 4, s. 7–14, 2015, ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2015.7126069](https://doi.org/10.1109/MEI.2015.7126069).
- [100] K. Kuhn, E. Pignanelli ja A. Schutze, “Versatile Gas Detection System Based on Combined NDIR Transmission and Photoacoustic Absorption Measurements”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, nro 3, s. 934–940, 2013, ISSN: 1530-437X. DOI: [10.1109/JSEN.2012.2224104](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2224104).
- [101] X. Wang, X. Yi, S. T. Li, Z. D. Wang, J. V. Hinshaw ja J. Noakhes, “Comparison of online and lab DGA methods for condition assessment of mineral and vegetable transformer oils”, teoksessa *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on*, 2012, s. 617–620. DOI: [10.1109/CMD.2012.6416220](https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416220).
- [102] S. Korobeynikov, Y. G. Soloveichik, A. L. Bychkov, D. V. Vagin, A. V. Melekhov ja A. Y. Ryzhkina, “Dissolution of diagnostic gas bubbles in transformer oil”, *High Temperature*, vol. 49, nro 5, s. 744–749, 2011.
- [103] S. Sorvo ja S. Juutinen, *Aloittelevan seloistuksenkirjoittajan opas*, Webdokumentti, Saatavilla <https://www.jyu.fi/science/opiskelu-ohjeet/fysiikka/tyoosasto/Selostuksenkirjoitusopas.pdf>, Viitattu 27.9.2016, 2015.

## A Liukoisuuskertoimien virheanalyysi

Taulukko A1: Ostwaldin kertoimet ( $L$ ) 20 °C - 25 °C lämpötilassa eri lähteiden mukaan [48][52][53][47][5].

| Kaasu                         | $L$ (liukoisuuskertoimet) |          |          |        |        |
|-------------------------------|---------------------------|----------|----------|--------|--------|
|                               | Cigré                     | IEC60567 | IEC60599 | IEEE   | Oommen |
|                               | 20 °C                     | 20 °C    | 20 °C    | 25 °C  | 25 °C  |
| H <sub>2</sub>                | 0,0504                    | 0,04     | 0,05     | 0,0429 | 0,056  |
| O <sub>2</sub>                | 0,172                     | 0,13     | 0,17     | 0,138  | 0,179  |
| N <sub>2</sub>                | 0,091                     | 0,07     | 0,09     | 0,0745 | 0,097  |
| CO                            | 0,125                     | 0,1      | 0,12     | 0,102  | 0,133  |
| CO <sub>2</sub>               | 1,1                       | 0,93     | 1,08     | 0,9    | 1,17   |
| CH <sub>4</sub>               | 0,423                     | 0,34     | 0,43     | 0,337  | 0,438  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 1,25                      | 1,0      | 1,20     | 0,938  | 1,22   |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,81                      | 1,47     | 1,70     | 1,35   | 1,76   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 2,88                      | 2,18     | 2,40     | 1,99   | 2,59   |

Taulukossa A1 esitetyistä liukoisuuskertoimista ja niiden vaihteluista on arvioitu näytteenvalmistuksessa käytettävälle noin 23 °C öljylle suhteellinen virhe näytteenvalmistuksessa käytettyihin Cigré:n määrittelemiін liukoisuuskertoimiін verrattuna. Virheen määrittelemiseksi kunkin kaasun taulukossa A1 esitetyistä liukoisuuskertoimista on laskettu keskihajonta, joka on lisäksi kerrottu kahdella. Näin saadaan arviolta virhealue, jonka sisällä noin 95 % liukoisuuskertoimista tulisi sijaita. Kaksinkertainen keskihajonta on sen jälkeen suhteutettu käytettyihin arvoihin, jotta voidaan arvioida aiheutuvaa suhteellista virhettä. Tämän jälkeen liuetettavien kaasujen suhteellisista virheistä on vielä otettu keskiarvo. Happi- ja typpikaasu on siis jätetty tämän arvioinnin ulkopuolelle, sillä niiden liukenemista ei erityisesti työssä tarkastella. Näin ollen saadaan, kuten taulukosta A2 nähdään, suhteelliseksi virheeksi kaikille kaasuille arvioitua noin 21 %. Kullekin kaasulle siis täten käytetty yhteistä suhteellista virhettä. Kaasujen yksittäisiä suhteellisia virheitä voitaisiin mahdollisesti käyttää suoraan, mutta koska tämänkaltaisen arviointi on muutenkin hieman epävarmaa nähtiin parhaimmaksi valita jonkinlainen keskiarvoistettu virhe kaikille kaasuille.

Taulukko A2: Liukoisuuskertoimien keskihajonnat, käytettyihin arvoihin suhteutettu kaksinkertaisen keskihajonnan perusteella lasketut suhteelliset virheet ja liukoisuuskertoimien virheen keskiarvo.

| Kaasu                         | $L$    | Keskihajonta | Keskihajonta x2 | Suhteellinen virhe [%] |
|-------------------------------|--------|--------------|-----------------|------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 0,0504 | 0,05721      | 0,011443        | 22,703962 %            |
| O <sub>2</sub>                | 0,172  | 0,019823     | 0,039646        | 23,0502543 %           |
| N <sub>2</sub>                | 0,091  | 0,010383     | 0,020765        | 22,8190723 %           |
| CO                            | 0,125  | 0,012946     | 0,025892        | 20,713667 %            |
| CO <sub>2</sub>               | 1,1    | 0,103653     | 0,207307        | 18,8460488 %           |
| CH <sub>4</sub>               | 0,423  | 0,045249     | 0,090497        | 21,394159 %            |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 1,25   | 0,127131     | 0,254262        | 20,3409278 %           |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,81   | 0,177471     | 0,354942        | 19,610069 %            |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 2,88   | 0,310702     | 0,621405        | 2105765576 %           |
| Keskiarvo [%]                 |        |              |                 | 20,7407702 %           |

## B Massavirtasäätimien virtausnopeuden virheanalyysi

Käytettyjen massavirtasäätimien valmistajan antama virtausnopeuden suhteellinen virhe on 1 %. Massavirtasäätimien virtausnopeutta tarkasteltiin tekemällä mittauksia virtausnopeusmittarilla. Virtausnopeusmittarina käytettiin kalibroitua Drycal ML-500 virtausnopeusmittaria. Massavirtasäätimien läpi virtautettiin eri virtausnopeusasetuksilla typeä ja mitattiin virtausnopeusmittarilla 10 mittausta, joiden keskiarvot on esitetty taulukossa B1. Näiden mittaustulosten perusteella päätettiin virhe-analyysiä yksinkertaistaa olettamalla massavirtasäätimien tarkkuudeksi  $\pm 1,5$  ml/min ja kokonaisvirtauksen tarkkuudeksi  $\pm 5$  ml/min. Taulukosta B1 voidaan havaita, että mittausten perusteella 1,5 ml/min virhettä ei koskaan saavutettu, joten se on todennäköisesti riittävän tarkka arvio massavirtasäätimien virtausnopeuden virheelle. On myös huomautettava, että massavirtasäätimien luvatus toimintatarkkuuden ylitys johtuu mitä ilmeisimmin siitä että ne ovat yli 10 vuotta vanhoja ja olleet alkukalibroinnin jälkeen kalibroimattomia.

Taulukko B1: Massavirtasäätimien todelliset mitatut virtausnopeudet.

| Säätimen                  | Säädetty virtausnopeus [ml/min] |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Toiminta-alue<br>[ml/min] | 178                             | 100   | 60    | 30    | 20    | 8     | 5     | 2     | 0,5   |
| 0-500                     | 178,4                           | 99,87 | 59,23 |       | 18,95 |       | 3,802 |       |       |
| 0-100                     |                                 |       | 61,5  | 30,93 | 20,83 |       | 5,497 |       |       |
| 0-50                      |                                 |       |       | 29,49 |       |       | 4,741 |       |       |
| 0-10                      |                                 |       |       |       |       | 8,117 | 5,052 | 2,056 | 0,57  |
| 0-5                       |                                 |       |       |       |       |       |       | 1,966 | 0,447 |

Massavirtasäätimillä on myös eroja riippuen mille kaasulle ne on tarkoitettu. Massavirtasäätimet yleensä kalibroidaan tietylle kaasulle, ja eri kaasun käyttäminen aiheuttaa tiettyä vääristymää virtaukseen, jolloin on käytettävä valmistajan ilmoittamia korjauskertoimia  $F_{Cr}$ . Kertoimet eri kaasuille on esitetty taulukossa B2. Taulukosta B2 nähdään, että korjauskertoimilla voi olla merkittävä vaikutus todelliseen virtausnopeuteen. KES-näytteenvalmistuslaitteessa käytetään hyväksi korjauskertoimia, mutta käytännössä niiden vaikutus jää pieneksi, sillä kompensointikertoimet pätevät sellaisenaan vain puhtaille kaasuille. Kaasuseoksia käytettäessä on laskettava uusi suhteutettu korjauskerron käyttäen taulukon B2 arvoja ja yhtälöä B1:

$$F_{Cr,R} = \frac{100}{\frac{C_{B,1}}{F_{Cr,1}} + \frac{C_{B,2}}{F_{Cr,2}}}, \quad (B1)$$

missä  $C_{B,1}$  on ensimmäisen ja  $C_{B,2}$  toisen seoskaasun pullopitoisuus prosentteina sekä  $F_{Cr,1}$  ensimmäisen ja  $F_{Cr,2}$  toisen seoskaasun korjauskertoimet. Kaikki tässä työssä käytetyt kaasupullot on täytetty nimelliskaasun lisäksi typellä. Näytteenvalmistuslaitteessa käytetyt massavirtasäätimet ovat myös kalibroitu typpikaasulle. Käytetyille pullopitoisuuksille

lasketut suhteelliset korjauskertoimet on esitetty taulukossa B3. Suhteellisten korjauskerroimien vaikutus näytteenvalmistukseen käytetyillä pullopitoisuuksilla on minimaalinen, eikä korjauskertoimella kompensoinnin poisjättäminen aiheuttaisi siis merkittävää virhettä. Tästä riippumatta näytteenvalmistuslaitteessa kuitenkin käytettiin suhteutettuja korjauskertoimia.

Taulukko B2: Massavirtasäätimien valmistajan esittämiä korjauskertoimia käytetyille kaasuille.

|          | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | CO    | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|----------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------|----------------|
| $F_{Cr}$ | 1,008          | 0,763           | 0,615                         | 0,619                         | 0,49                          | 0,995 | 0,74            | 1,000          |

Taulukko B3: Massavirtasäätimien lasketut ja näytteenvalmistuksessa käytetyt suhteelliset kompensointikertoimet  $F_{Cr,R}$  eri kaasuille ja pullopitoisuuksille  $C_B$ .

| Kaasu                         | $C_B$   | $F_{Cr,R}$  |
|-------------------------------|---------|-------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | 1,000158755 |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | 0,999391563 |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | 0,999874812 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | 0,999569329 |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | 0,999271959 |
| CO                            | 0,1 %   | 0,999994975 |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | 0,998246324 |



## C Näytteenvalmistuksen virhelaskelmat

Näytteenvalmistuksessa saatujen pitoisuuksien suhteellista virhettä lähestyttiin käyttämällä virheen etenemisen lakia (yhtälö 11). Lain avulla tarkasteltiin eri virhetekijöiden vaikutusta näytteenvalmistuslaitteella aikaansaattavaan pitoisuuteen. Näytteenvalmistusyhtälö yksinkertaistettiin muokkaamalla yhtälöä 10 ja jättämällä paineenvaikutus huomioimatta seuraavasti:

$$C_L = \frac{F_G}{F_T} \cdot L \cdot C_B, \quad (C1)$$

missä  $C_L$  on yksittäisen kaasun öljynäytteeseen liuenut kaasukonsentraatio,  $C_G$  on syötetyn kaasun konsentraatio kaasuseoksessa,  $L$  on Ostwaldin kerroin,  $C_B$  on kaasupullon konsentraatio,  $F_G$  on liuotettavan ja syötetyn kaasun virtausnopeus ja  $F_T$  on kaikkien syötettyjen kaasujen kokonaisvirtaus. Kun yhtälö C1 sijoitetaan virheen etenemisen lakiin ja lasketaan osittaisderivaatat saadaan muodostettua seuraava yhtälö:

$$\delta C_L = \left[ \left( \frac{1}{F_T} \cdot L \cdot C_B \cdot \delta F_G \right)^2 + \left( -\frac{F_G}{(F_T)^2} \cdot L \cdot C_B \cdot \delta F_T \right)^2 + \left( \frac{F_G}{F_T} \cdot L \cdot \delta C_B \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (C2)$$

missä  $\delta C_L$  on yksittäisen kaasun öljynäytteeseen liuenneen kaasukonsentraation virhe,  $\delta F_G$  on kaasun virtausnopeuden virhe,  $\delta F_T$  on kaasun kokonaisvirtauksen virhe ja  $\delta C_B$  on pullopitoisuuden virhe. Muodostetun yhtälön C2 pohjalta on laskettu pitoisuuksien suhteellisia virheitä eri kaasuille. Massavirtasäätimien virheenä  $\delta F_G$  käytetään 1,5 ml/min ja kokonaisvirtauksen virheenä  $\delta F_T$  käytetään 5 ml/min. Liitteessä B on selitetty tarkemmin miksi nämä arvot on valittu massavirtasäätimien keskimääräisiksi virheiksi. Taulukossa C1 on esitetty pitoisuuksien virheiden laskuun käytetyt muuttujat ja lasketut virheet ilman Ostwaldin kertoimen aiheuttamaa virhettä sekä ppm-arvoina että öljynäytteen suhteellisenä pitoisuusvirheenä. Taulukosta C1 nähdään hyvin kuinka pullopitoisuudet ja Ostwaldin kertoimet vaikuttavat suoraan vaadittavaan kaasun virtausnopeuteen. Taulukosta C1 voidaan myös havaita selkeästi kuinka pienemmät virtausnopeudet aiheuttavat paljon suuremman suhteellisen virheen, sillä massavirtasäätimien keskimääräinen virhe on tällöin suhteessa suurempi. Voidaan myös todeta, että näytteenvalmistuksen tarkkuus on selkeästi parempi valmistettaessa korkeampia pitoisuuksia kuin matalia pitoisuuksia. Nähdään myös kuinka etaanin korkea liukoisuuskerroin aiheuttaa käytetyllä pullopitoisuudella ongelmia tasalaatuisen näytteen valmistuksessa.

Ostwaldin kertoimien keskimääräistä virhettä on tarkasteltu tarkemmin liitteessä A. Tarkastelun ja pohdinnan perusteella on päätetty liukoisuuskertoimien keskimääräisen virheen olevan noin 21 %. Sijoittamalla näytteenvalmistusyhtälö 10 virheen etenemislakiin

Taulukko C1: KES-näytteenvalmistuslaitteelle virheen etenemislain mukaisesti lasketut virheet  $\delta C_L$  (liukoisuuskertoimien vaikutusta huomioimatta).

| Kaasu                         | $C_B$   | $\delta C_B$ | $L$    | $C_L$<br>[ppm] | $F_G$<br>[ml/min] | $\delta C_L$<br>[ppm] | $\delta C_L$<br>[%] |
|-------------------------------|---------|--------------|--------|----------------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | ±2,0 %       | 0,0504 | 100            | 17,66             | ±9,17                 | ±9,17 %             |
|                               |         |              |        | 400            | 70,63             | ±16,20                | ±4,05 %             |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | ±2,0 %       | 0,423  | 80             | 17,18             | ±7,51                 | ±9,39 %             |
|                               |         |              |        | 200            | 42,94             | ±9,82                 | ±4,91 %             |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | ±2,0 %       | 1,25   | 10             | 7,12              | ±2,13                 | ±21,35 %            |
|                               |         |              |        | 50             | 35,6              | ±2,72                 | ±5,44 %             |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 1,81   | 170            | 23,88             | ±11,72                | ±6,90 %             |
|                               |         |              |        | 505            | 70,95             | ±17,93                | ±3,55 %             |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 2,88   | 55             | 4,86              | ±17,06                | ±31,02 %            |
|                               |         |              |        | 100            | 8,83              | ±17,23                | ±17,23 %            |
| CO                            | 0,1 %   | ±0,5 %       | 0,125  | 50             | 71,2              | ±1,77                 | ±3,55 %             |
|                               |         |              |        | 100            | 142,4             | ±3,04                 | ±3,04 %             |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | ±0,5 %       | 1,1    | 2000           | 67,73             | ±73,51                | ±3,68 %             |
|                               |         |              |        | 4000           | 129,45            | ±123,18               | ±3,08 %             |

(yhtälö 11) ja huomioiden siinä myös liukoisuuskertoimien virhe saadaan muodostettua näytteenvalmistuksen virheestä seuraavanlainen yhtälö:

$$\delta C_{L,Ost} = \left[ \left( \frac{1}{F_T} \cdot L \cdot C_B \cdot \delta F_G \right)^2 + \left( -\frac{F_G}{(F_T)^2} \cdot L \cdot C_B \cdot \delta F_T \right)^2 + \left( \frac{F_G}{F_T} \cdot C_B \cdot \delta L \right)^2 + \left( \frac{F_G}{F_T} \cdot L \cdot \delta C_B \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (C3)$$

missä  $\delta C_{L,Ost}$  on yksittäisen kaasun öljynäytteeseen liuenneen kaasukonsentraation virhe ja  $\delta L$  on liukoisuuskertoimen virhe. Massavirtasäätimien virheenä  $\delta F_G$  käytetään jälleen 1,5 ml/min ja kokonaisvirtauksen virheenä  $\delta F_T$  käytetään 5 ml/min.

Muodostetun yhtälön C3 pohjalta on laskettu pitoisuuksien suhteellisia virheitä eri pitoisuuksille ja kaasuille huomioiden myös liukoisuuskertoimien aiheuttama virhe. Taulukossa C2 on esitetty pitoisuuksien virheiden laskuun käytetyt muuttujat ja lasketut virheet, sekä pitoisuuksien virheet ppm-arvoina ja suhteellisenä öljynäytteen pitoisuusvirheenä. Taulukon C2 lasketuista virheistä nähdään jälleen kuinka pienet virtausnopeudet aiheuttavat merkittävämpiä suhteellisia virheitä, mutta voidaan myös havaita, että niiden vaikutus on huomattavasti pienempi verrattuna liukoisuuskertoimen aiheuttamaan virheeseen. Myös korkeiden ja matalien pitoisuuksien valmistuksen erot ovat vähentyneet selkeästi.

Taulukko C2: KES-näytteenvalmistuslaitteelle virheen etenemislain mukaisesti lasketut virheet  $\delta C_{L,Ost}$  (liukoisuuskertoimien virheen vaikutus huomioon ottaen).

| Kaasu                         | $C_B$   | $\delta C_B$ | $L$    | $C_L$<br>[ppm] | $F_G$<br>[ml/min] | $\delta C_{L,Ost}$<br>[ppm] | $\delta C_{L,Ost}$<br>[%] |
|-------------------------------|---------|--------------|--------|----------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | ±2,0 %       | 0,0504 | 100            | 17,66             | ±22,00                      | ±22,00 %                  |
|                               |         |              |        | 400            | 70,63             | ±81,62                      | ±20,41 %                  |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | ±2,0 %       | 0,423  | 80             | 17,18             | ±18,40                      | ±23,00 %                  |
|                               |         |              |        | 200            | 42,94             | ±43,13                      | ±21,57 %                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | ±2,0 %       | 1,25   | 10             | 7,12              | ±2,99                       | ±29,95 %                  |
|                               |         |              |        | 50             | 35,6              | ±10,85                      | ±21,69 %                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 1,81   | 170            | 23,88             | ±37,58                      | ±22,10 %                  |
|                               |         |              |        | 505            | 70,95             | ±107,55                     | ±21,30 %                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 2,88   | 55             | 4,86              | ±20,60                      | ±37,46 %                  |
|                               |         |              |        | 100            | 8,83              | ±27,16                      | ±27,16 %                  |
| CO                            | 0,1 %   | ±0,5 %       | 0,125  | 50             | 71,2              | ±10,65                      | ±21,30 %                  |
|                               |         |              |        | 100            | 142,4             | ±21,22                      | ±21,22 %                  |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | ±0,5 %       | 1,1    | 2000           | 67,73             | ±426,39                     | ±21,32 %                  |
|                               |         |              |        | 4000           | 129,45            | ±848,98                     | ±21,22 %                  |

Suurin osa mitatuista näytteistä on valmistettu korkeamman paineen alaisuudessa, jolloin yhtälön 10 mukainen painekompensointi pienentää käytetyn virtausnopeuden paineiden suhteen mukaisesti pienemmäksi. Tällöin saadaan aikaan sama liuenneen kaasun pitoisuus öljynäytteessä pienemmällä virtauksella, minkä teoriassa pitäisi parantaa näytteenvalmistuksen tarkkuutta. Tämä johtuu siitä, että pienemmällä virtauksella aikaansaadetaan korkeampi pitoisuus, jolloin virheen etenemislain kautta muodostetulla yhtälöllä C2 ja C3 saadaan pienemmät suhteelliset virheet. Kyseinen näytetarkkuuden parannus on kuitenkin hieman kyseenalainen. Tästä syystä on näytteenvalmistuksen tarkkuudeksi suoritetuista tarkasteluista huolimatta oletettu aiemmin laskettujen ja taulukoissa C1 ja C2 esitettyjen virhe-arvioiden olevan paremmin todellisuutta vastaavia. Paineen kompensointi aiheutti myös todennäköisesti vertailukelpoisuusongelmia laboratorionäytteiden kanssa, sillä korkeammassa paineessa liuotetut kaasut todennäköisimmin karkaavat hyvin voimakkaasti kohdatessaan ilmanpaineen. Tätä oletettua ilmiötä pystyttäisiin laskennallisesti korjaamaan tuloksissa, mutta korjauksen luotettavuus on hieman kyseenalainen. On nimittäin hyvin hankala tietää varmasti kuinka voimakkaasti paineistettuna valmistettujen öljynäytteiden liuenneet kaasut oikeasti reagoivat ilmanpaineen kohtaamiseen kyseisessä tilanteessa. Paineekompensoinnilla laskettujen virtausnopeuksien mukaiset virhe-arviot on kuitenkin esitetty vertailun vuoksi, ilman liukoisuuskertoimien aiheuttamaa virhettä taulukossa C3 ja liukoisuuskertoimien aiheuttaman virheen kanssa taulukossa C4.

Taulukko C3: KES-näytteenvalmistuslaitteelle virheen etenemislain mukaisesti lasketut virheet  $\delta C_{L,P}$  (liukoisuuskertoimien vaikutusta huomioimatta) painekompensoituja virtausnopeuksia  $F_{G,P}$  käyttäen.

| Kaasu                         | $C_B$   | $\delta C_B$ | $L$    | $C_L$<br>[ppm] | $F_{G,P}$<br>[ml/min] | $\delta C_{L,P}$<br>[ppm] | $\delta C_{L,P}$<br>[%] |
|-------------------------------|---------|--------------|--------|----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | ±2,0 %       | 0,0504 | 100            | 13,80                 | ±8,91                     | ±8,91 %                 |
|                               |         |              |        | 400            | 55,18                 | ±13,72                    | ±3,43 %                 |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | ±2,0 %       | 0,423  | 80             | 13,42                 | ±7,31                     | ±9,14 %                 |
|                               |         |              |        | 200            | 33,55                 | ±8,82                     | ±4,41 %                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | ±2,0 %       | 1,25   | 10             | 5,56                  | ±2,12                     | ±21,24 %                |
|                               |         |              |        | 50             | 27,81                 | ±2,50                     | ±5,00 %                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 1,81   | 170            | 18,66                 | ±11,33                    | ±6,66 %                 |
|                               |         |              |        | 505            | 55,43                 | ±15,51                    | ±3,07 %                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 2,88   | 55             | 3,79                  | ±17,03                    | ±30,97 %                |
|                               |         |              |        | 100            | 6,90                  | ±17,13                    | ±17,13 %                |
| CO                            | 0,1 %   | ±0,5 %       | 0,125  | 50             | 55,63                 | ±1,53                     | ±3,07 %                 |
|                               |         |              |        | 100            | 111,25                | ±2,47                     | ±2,47 %                 |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | ±0,5 %       | 1,1    | 2000           | 50,57                 | ±64,31                    | ±3,22 %                 |
|                               |         |              |        | 4000           | 101,14                | ±100,48                   | ±2,51 %                 |

Taulukko C4: KES-näytteenvalmistuslaitteelle virheen etenemislain mukaisesti lasketut virheet  $\delta C_{L,Ost,P}$  (liukoisuuskertoimien virheen vaikutus huomioon ottaen) painekompensoituja virtausnopeuksia  $F_{G,P}$  käyttäen.

| Kaasu                         | $C_B$   | $\delta C_B$ | $L$    | $C_L$<br>[ppm] | $F_{G,P}$<br>[ml/min] | $\delta C_{L,Ost,P}$<br>[ppm] | $\delta C_{L,Ost,P}$<br>[%] |
|-------------------------------|---------|--------------|--------|----------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 2,0 %   | ±2,0 %       | 0,0504 | 100            | 13,80                 | ±17,99                        | ±17,99 %                    |
|                               |         |              |        | 400            | 55,18                 | ±63,99                        | ±16,00 %                    |
| CH <sub>4</sub>               | 0,196 % | ±2,0 %       | 0,423  | 80             | 13,42                 | ±15,02                        | ±18,78 %                    |
|                               |         |              |        | 200            | 33,55                 | ±33,98                        | ±16,99 %                    |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,02 %  | ±2,0 %       | 1,25   | 10             | 5,56                  | ±2,68                         | ±26,84 %                    |
|                               |         |              |        | 50             | 27,81                 | ±8,58                         | ±17,15 %                    |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 1,81   | 170            | 18,66                 | ±30,10                        | ±17,71 %                    |
|                               |         |              |        | 505            | 55,43                 | ±84,29                        | ±16,69 %                    |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,07 %  | ±0,5 %       | 2,88   | 55             | 3,79                  | ±19,28                        | ±35,05 %                    |
|                               |         |              |        | 100            | 6,90                  | ±23,72                        | ±23,72 %                    |
| CO                            | 0,1 %   | ±0,5 %       | 0,125  | 50             | 55,625                | ±8,35                         | ±16,69 %                    |
|                               |         |              |        | 100            | 111,25                | ±16,59                        | ±16,59 %                    |
| CO <sub>2</sub>               | 0,5 %   | ±0,5 %       | 1,1    | 2000           | 55,63                 | ±334,37                       | ±16,72 %                    |
|                               |         |              |        | 4000           | 101,14                | ±663,90                       | ±16,60 %                    |